

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Podzemní díla minulosti

Subterranean Works of the Past

Student:

Kateřina Jehlářová

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání bakalářské práce

Student: **Kateřina Jehlářová**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika
Téma: Podzemní díla minulosti
Subterranean Works of the Past

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Úvod

Účel podzemních staveb

Metody a nástroje výstavby

Reprezentativní příklady podzemních staveb minulosti a jejich popis (do konce 19.století)

Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Gösta E. Sandström : *The history of Tunnelling*. London : Barrie Books Ltd., 1963

Beaver, P. : *A History of Tunnels*. London : Citadel Press, Secaucus, 1973

Sedláček, J. : *Štoly a tunely*. Praha : SNTL, 1954

Straka, J. : *Podzemní stavby*. Praha : SNTL, 1966

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.**

Datum zadání: 31.10.2017

Datum odevzdání: 30.11.2018

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.



V Ostravě 30.11.2018

podpis studenta

Prohlašuji:

- Byla jsem seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 11/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Abstrakt

V bakalářské práci shrnuji a popisuji historická podzemní díla od počátku vývoje lidské civilizace do konce 19. století. Práce je rozdělena do čtyř kapitol. První kapitolou je úvod, ten mou práci ve zkratce představuje. Druhá kapitola rozděluje podzemní stavby dle jejich účelu. Zdůvodňuje proč lidé podzemní stavby budovali a jak je využívali. Třetí kapitola pak popisuje nástroje a metody, které byly použity při vyměřování, ražbě a dobývání podzemních staveb. Uvádí vystrojování děl, jejich odvodnění a větrání. Koncem své práce, ve čtvrté kapitole, představuji a popisuji zajímavá díla ze zahraničí i České republiky. Jejich historii, účel a způsob stavby.

Klíčová slova:

podzemní stavby, účel podzemních staveb, vývoj technologie výstavby podzemních staveb, Rudolfova štola, Tunel Eupalinos

Abstract

In the bachelor thesis I summarize and describe historical underground works from the beginning of the development of human civilization till the end of the 19th century. The thesis is divided into four chapters. The first chapter is an introduction, that is my work in a nutshell. The second chapter divides the underground structures according to their purpose. It explains why people built the underground constructions and how they used them. The third chapter describes the tools and methods used for the measurement, excavation and mining of underground structures. Provides equipment, drainage and ventilation. At the end of my work in the fourth chapter, I present and describe interesting works from both the Czech Republic and abroad. Their history, purpose and method of construction.

Key words:

subterranean structures, the purpose of underground constructions, development of underground construction technology, Rudolph's tunnel, Eupalinos tunnel

Obsah:

1. Úvod.....	1
2. Účel podzemních staveb	2
2.1. Přírodní díla	2
2.2. Sakrální stavby	3
2.3. Profánní stavby	7
2.4. Militaristická díla.....	18
2.5. Podzemní lomy a báňská díla	18
3. Metody a nástroje výstavby	20
3.1. Nástroje sloužící k vytyčení stavby	20
3.2. Historické nástroje a metody k rozpojování hornin.....	21
3.3. Od černého prachu k dynamitu.....	22
3.4. Od vrtáku k razicímu stroji.....	24
3.5. Klasické tunelovací metody.....	26
3.6. Odkliz a vyztužování	28
3.7. Větrání a odvodnění.....	29
4. Reprezenační příklady	30
4.1. Tunel Eupalinos.....	30
4.2. Rudolfova štola.....	33
4.3. Tunel Malpas	36
4.4. Dědičná štola císaře Josefa II.	37
4.5. Tunel Hoosac.....	38
4.6. Tunel Mount Cenis (Fréjus)	40
4.7. Gotthardský železniční tunel	41
4.8. Chicago lake tunel	42
5. Závěr	44
6. Seznamy.....	45

1. Úvod

V pravěku lidé hledali úkryt před počasím nebo predátory. Jeskyně tuto výhodu poskytovaly, byly ideální skrýš pro tehdejší obyvatelé. Zde vznikala první kapitola dějin umění, a to v podobě nástěnných maleb. Malby zobrazovaly zvířata, postavy lovců nebo otisky rukou.

S rozvojem civilizací přišla nutnost vyhledávat stavební materiály pro rozvoj měst. A to nejen na povrchu, ale také v podzemní. V roce 200 př.n.l. začali Římané těžit pucolán jako příměs do betonu z podzemních lomů. Tyto doly s různými surovinami se nacházely na více místech. Po vytěžení vznikly pod zemí kaverny, které lidé začaly využívat. Například jako podzemní cisterny nebo sklady. Následně začali budovat podzemní objekty účelně v podobě hrobek, chrámů a obytných prostor. Důležité byly také viadukty, které přiváděly vodu do vzdálených měst, a to často přes překážky. Pro zvýšení čistoty měst budovali kanalizace, které se občas používají dodnes. Ačkoli měli tehdejší stavitelé jen primitivní nástroje, dokázali vybudovat ohromující stavby. Rozpadem Římské říše se výstavba podzemních inženýrských staveb přerušila na několik století. Výstavbu podzemních děl v Evropě oživila teprve na konci středověku a počátku novověku společenská potřeba výstavby dopravních cest.

Doba se vyvíjela a zrychlovala. Lidé budovali tunely pro pěší, plavební nebo železniční tunely. Potřeba nových podzemních děl a stále vyšší požadavky na jejich užité parametry, délku, plochu a dobu výstavby vedly k rozvoji nových technických prostředků pro jejich výstavbu, které postupně nahrazovaly primitivní ruční nástroje. Vynalezeny byly vrtačky, dynamit nebo první razicí stroj, který přinesl velké usnadnění v ražbě tunelů. Důležitým milníkem v podzemním stavitelství bylo metro. První metro bylo postaveno v Londýně v roce 1863 a následně v Istanbulu mezi lety 1867 až 1875.

Cílem práce je shrnout a představit historii podzemního stavitelství, vývoj techniky a přístrojů použitých při ražbě a budování podzemních děl. A také podrobněji popsat vybrané stavby do konce 19. století.

2. Účel podzemních staveb

Lidé jako první využívali jeskyně, které za ně vytvořila příroda. Většina raných podzemních objektů sloužily účelům náboženským a existencionálním. Stavěly se hrobky a skalní chrámy i celá skalní města pro tisíce lidí. S potřebou přivádět pitnou vodu do měst, vznikly akvadukty a cisterny, v kterých byla voda shromažďována. Města se rozvíjela a civilizovala, vznikla tedy potřeba odvádět dešťovou a splaškovou vodu. Rozpadem říše Římské výstavba tunelů zanikla. Začali se budovat víc jak po 100 letech až začátkem novověku. Ve 13. století se stavěly hrady s jejich tajnými únikovými cestami a sklepy. Do té doby se razily tunely, respektive štoly jen malých rozměrů. Na počátku průmyslové revoluce začala ražba velkých plavebních, pěších nebo železničních tunelů. Ty překonávaly překážky jako jsou hory nebo řeky. Shrnutí všech staveb popsanych v kapitole najdeme v příloze **tabulka 1**. V tabulce je uvedena stavba její typ, poloha a zařazení do časové osy.

2.1. Přírodní díla

Jeskyně člověk odpradáвна využíval jako své obydlí. Dílo vytvořeno přírodou zejména vodou, která v sobě rozpouští oxid uhličitý. Tím se z vody stává slabá kyselina uhličitá. Ta vniká do krasových komplexů povětšinou puklinami a rozpouští horniny. Nacházejí se po celém světě. Na našem území je téměř 4 000 jeskyní, ale z toho přístupných jen 14. Dochovalo se několik důkazů o obydlení jeskyní a života v nich. Kupříkladu **jeskyně Šipka** ve městě Štramberk nebo **Mladečské jeskyně** u malé obce Mladeč, která byla osídlena člověkem cromagnonským. Jedním skvostem je jeskyně **Lascaux** (JZ Francie, 17 000 let stáří), která je považována za Sixtinskou kapli. Je nádherně vyzdobena několika tisíci kresbami tehdy žijících zvířat. (Obrázek 1)



Obrázek 1: Malby v jeskyni Lascaux
(<http://www.sacred-sites.org/threatened-sacred-sites/lascaux-cave/>)

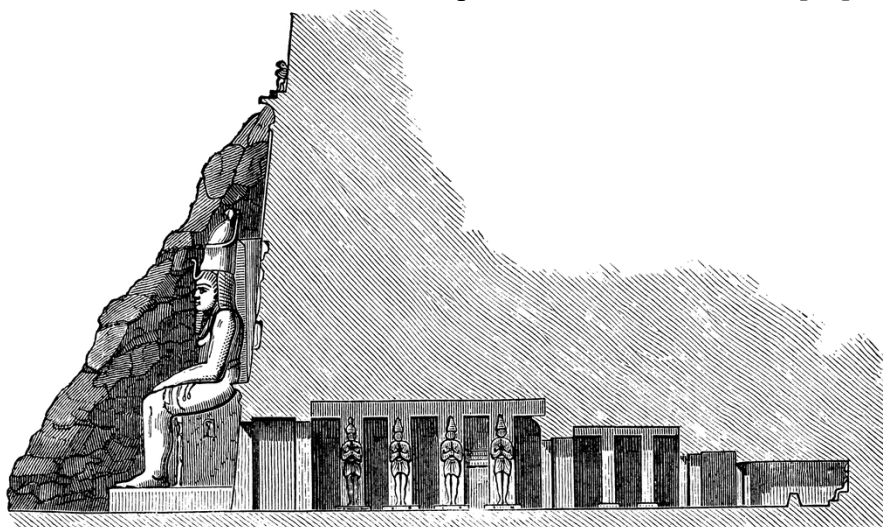
2.2. Sakrální stavby

Posvátné stavby byly vytvářeny k obřadním rituálům a pohřbívání mrtvých. Lidé hloubili i razili prostory různých rozměrů, ty pak případně zdobili různými malbami či reliéfy.

- Egypt

Nejstarší egyptské pohřebiště se nachází v **Údolí Králů**. Obsahuje celkem 65 hrobek, které měly usnadnit svým majitelům cestu na onen svět. Byly naplněny zlatem a drahými věcmi. Avšak návštěvníkům je dnes přístupná jen třetina hrobek. K těm nejkrásnějším patří **Tutanchamonova hrobka**.

Egyptské stavby se vyvíjely v čase, nejstarším typem jsou mastaby. **Mastaba** byla předchůdkyně pyramid, má tvar komolého jehlanu, obdélníkový půdorys a je nižší než pyramida. Ta nejstarší byla postavena faraonu Menimu. **Pyramida** má tvar jehlanu, čtvercového půdorysu a je postavena z kvádrových bloků. Hrobky byly bohatě vyzdobeny jak malbami, tak i architektonicky. Tunelování bylo obtížné a zdlouhavé, proto využívali již stávajících puklin v masívech. Stavby byly velice přesně situovány podle světových stran nebo hvězd, jelikož Egypťané velice uznávali své božstvo a věřili na posmrtný život. Hrobka měla podzemní a nadzemní část, hrob se nacházel v nejnižším bodě celé stavby a měl několik komor. Budovány byly také velké **chrámové komplexy**. Jejich hlavním prvkem byl takzvaný architráv (vodorovný kámen na vzpěrách). Mezi nejznámější chrámové komplexy patří Karnak, Luxor nebo chrám královny Hatšepsut. Dvojice chrámů v Abu Simbel (Obrázek 2) byla vytesána do skalního masívu ve 13. století př.n.l a zasvěcena bohům. [29]



Obrázek 2: Řez chrámem Abu Simbel
(<http://etc.usf.edu/clipart/59100/59162/59162abusimbelcs.htm>)

- Turecko

Na Lýkijském pobřeží se nachází až 3 000 let staré hrobky, které jsou vytesány vysoko nad řekou. Lýkijci věřili na život po životě a jejich hrobky vypadaly jako chrámy. Nejznámější je **Amyntasova hrobka**. Její vchod je lemován sloupy, a tak trochu připomíná malý chrám. Stavba pochází ze 4. století př.n.l. (Obrázek 3) [27]



Obrázek 3: Stavby na Lýkijském pobřeží
(https://rainbowtours.cz/uploads/image/image/125512/hotel_804_66358_65071_1920x730.jpg)

- Itálie

U města Cerveteri se nachází etruská **nekropole Banditaccia**. Hrobky byly budovány z pěnovce (druh vápence) a nejstarší z nich pochází ze 7. století př.n.l. Byly budovány v pravidelném kubickém tvaru a situovány do městské zástavby. Lidé zde byli pohřbíváni i se svými cennostmi, které nám dnes odhalují etruskou kulturu.[18]

Na jihu ostrova Sicílie se nachází **nekropole Pantalica** s více jak 5 000 hrobkami. (Obrázek 4) Hrobky vytesané do vápence mají obdélníkový nebo eliptický tvar a jsou poměrně malé.

Hrobky byly převážně budovány v měkkých horninách. Pod zemí se nacházelo spletné bludiště podzemních chodeb. Nejznámější je podél cesty Via Appia v Římě, a to **Kalixtové katakomby**, které vznikly ve 2. století. Jsou zde hrobky několika papežů z 2.- 4. století. (Obrázek 5)



Obrázek 5: nekropole Pantalica

(<https://www.thethinkingtraveller.com/thinksicily/guide-to-sicily/archaeological-sites-in-sicily/the-necropolis-of-pantalica.aspx>)

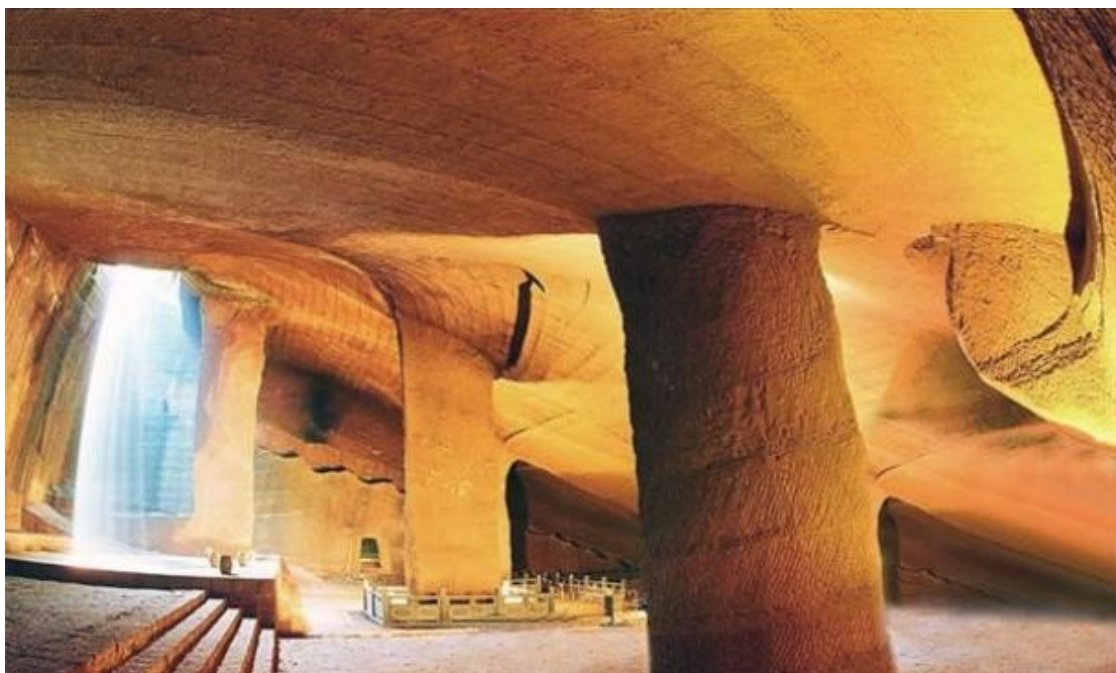


Obrázek 4: Kalixtové katakomby

(<http://www.nepomucenum.it/2017/11/navsteva-katakomb.html>)

- Čína

V hoře Chua-šan (Čína) je ukryt velký podzemní komplex chodeb a prostor z 4. století, každá z těchto prostor má své číslo. Číslo 35. také nazývána podzemní palác, zřejmě proto, že je opravdu královských rozměrů. Nachází se v hloubce 170 metrů pod povrchem a její rozloha obnáší 12,6 kilometrů čtverečních. Vchod do ní je relativně malý, a abyste se do ní mohli dostat, musíte projít dvaceti metrovým tunelem. Uprostřed podzemního paláce je 26 mohutných sloupů, které podpírají klenbu jeskyně. Tyto gigantické pilíře mají průměr přes 10 metrů. O tom, že jeskyně byly vyhloubeny lidmi, není pochyb, na povrchu stěn i stropů jsou viditelné stopy po nástrojích. Účel těchto jeskyní je doposud neznámý, ale to že nebyly vytvořeny k bydlení, je nepochybné. V této době jsou prostory přístupné turistům a komplex byl zařazen na seznam UNESCO. (Obrázek 6) [19]



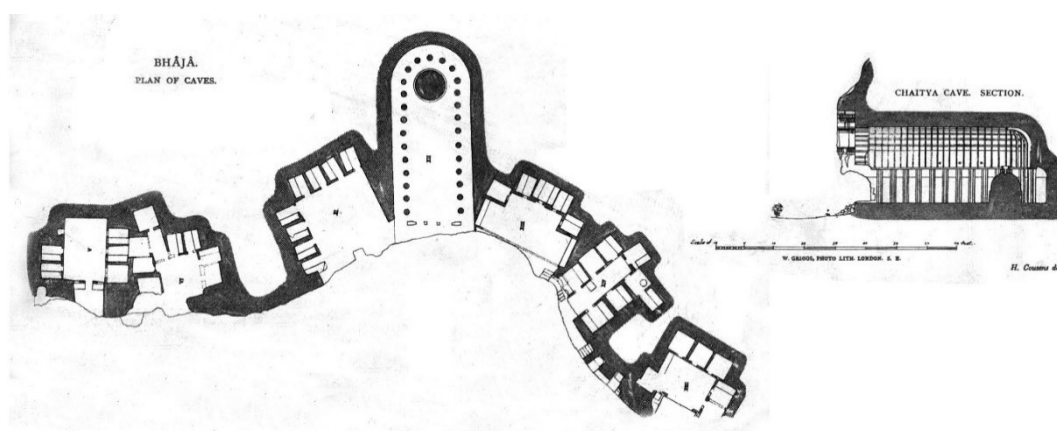
Obrázek 6: komplex Longyou v Číně
(<http://extrastory.cz/images/2014/10-rijen/10-2/1-longyou-caves-1.jpg>)

- Indie

Lomas Rishi cave je skalní chrám postaven okolo roku 250 př.n.l. Objekt je vyřezán do tvrdé monolitické žulové stěny Barabarských kopců.

Bhaja caves je skupina 22 objektů podobného stylu vytesaných do skály, vytvořeny okolo roku 200 př.n.l. V těchto skalních chrámech nebyla použita žádná vyzdívka, vše bylo jen z horniny, v které se objekt nacházel. (Obrázek 7) [20]

Karli cave je komplex buddhistických skalních chrámů datovaných kolem roku 78 př.n.l. Největší je Chaitya cave s délkou 45 m a výškou 14 m. Masív, do kterého jsou chrámy zapuštěny, je převážně z čediče. [29]



Obrázek 7: Bhaja cave (půdorys a řez)
(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/aa/Bhaja_caves_plan.jpg)

2.3. Profánní stavby

Všední stavby sloužící k užívání lidmi nejen pro bydlení, ale také pro uchovávání potravin a jiné potřeby. Zahrnuty jsou zde uměle vytvořené komory, akvadukty, kanalizace a také tunely.

- Obytná díla

U mnoha staveb je účel neznámý nebo nejasný, a byly budovány především pro bydlení, ukládání potravin nebo k obraně před nebezpečím.

Pozoruhodné jsou podzemní objekty v turecké **Kappadocii** přezdívané jako "pohádkové komíny". Ve 4. století začali křesťané utíkat od pronásledování Římem, našli útočiště v podzemních městech. Měkká skála z tufu umožnila obyvatelům budovat svá obydlí

i celá sídliště bez architektů. Ovšem krása není jen na povrchu, ale i v podzemí. Nachází se zde 36 jeskynních měst až pro 10 000 lidí. Můžeme zde nalézt obytné čtvrti, stáje, sklady i hřbitov se zazděnými kójiemi se zemřelými. Jednou z hlavních obcí je Goreme. Dodnes některé tyto objekty slouží jako hotely a soukromé rezidence. (Obrázek 8)



Obrázek 8: Kappadokie
(<http://turecko.webz.cz/Fotky/8-28-Zelve.JPG>)

Uplisciche je prehistorické skalní město nedaleko gruzínského města Gori. Jedno z nejstarších archeologických míst v Gruzii. Bylo osídleno v 6. století př. n. l. Ve skále jsou vytesány prostory, které sloužily vesničanům jako shromažďovací místa. Pozoruhodná je výzdoba stropů, podobající se sakrálním stavbám. Mimo jiné jsou zde podzemní chodby o rozloze dvanácti hektarů. [6]

Také v Jordánsku se nachází skalní město. **Město Pera** bylo vytesáno do červeně zbarvených skal, a to před více než 2 000 lety. Rozkvětu dosáhlo město v 1. století př.n.l., kdy bylo hlavním městem Nabatejské říše. Jedinou přístupovou cestou je klikatá soutěska Siq, která je lemována skalními stěnami do výšky až 200 m. Vchod do města zdobí nádherný vstupní portál vysoký 40 m a zdoben mnoha římsami, sochami a dalšími prvky vytesanými do skály. V roce 363 n.l. po zemětřesení byla zničena velká část města, která již nikdy nebyla opravena. V polovině 7. století bylo město Petra opuštěna a postupně zapomenuto. (Obrázek 9) [8]



Obrázek 9: Město Petra
(http://www.sokujiciplaneta.cz/files/images/Ur_n_Tomb_Petra_01.jpg)

- **Vodovodní štoly**

Vodovodní štoly jsou stavby přivádějící vodu do vzdálených oblastí, měly různé tvary příčných řezů. Často překonávají překážky, jako jsou hory nebo údolí, pomocí akvaduktů.

Blízký východ

Kolem roku 2000 př.n.l. v městě Gezer (Palestina) byla ražena vodovodní štola dlouhá asi 50 m, skála zde nese stopy po odsekávání pazourkovými nástroji.

Největší štolou je ta v Megiddu, je dlouhá 40 km a byla ražena před rokem 1200 př.n.l. Užívána a zdokonalena ještě za doby krále Šalamouna (po roku 1000 př.n.l.).

Město Jerusaleem před rokem 1200 př.n.l. bylo zásobováno vodou pouze z pramene Gihon, který však pramenil na nedostupném místě. Proto z něj byla svedena štola dlouhá sotva několik desítek metrů pod městskými hradbami do vytvořené studny.

Další štola z pramene Gihon byla ražena fénickými odborníky kolem roku 700 př.n.l. a vodu přiváděla do rybníku Siloe (tehdejší koupací nádrž). Byla ražena skálou a její výška u vstupu je 1,8 m a průřez se uprostřed stahuje až na 0,8 m šířky. Štola byla ražena z obou stran, ale je jisté že štolu nevytyčovali nebo, že vytyčovat neuměli, jelikož má trasu velice křivolakou.

Mnoho náboženských obřadů obsahovalo očistu, proto byly vybudovány veřejné vodovody již v roce 726 př.n.l. V domech vysoce postavených aristokratů byla voda přiváděna v olověných trubkách, a to studená i teplá.

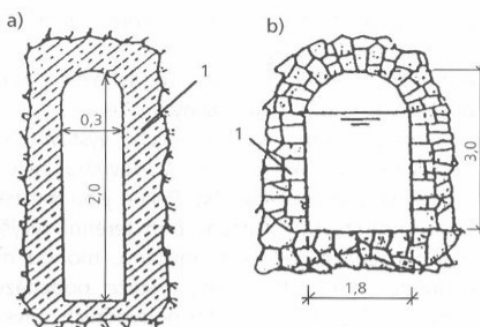
Řecko

V roce 300-500 př.n.l. používali k distribuci vody trubky z olova a bronzů o délce 10 stop a více. Olověný plech byl ohnut a podélně spájen slitinou olova a cínů. Hlavní město Řím napájelo celkem sedm akvaduktů, z nich nejstarší je Aqua Appia. Akvadukt byl vybudován roku 312 př.n.l. a přiváděl vodu z pramene vzdáleného 16,4 km. V samotném Řecku bylo vybudováno stovky akvaduktů, obsahující tunely pod kopci nebo sifony pod řekami. Fungovalo také zavlažování polí přes cihelné kanály.

Nejstarší dochovaným akvaduktem je tunel v Evropě **Eupalinos** (ostrov Sámos), dlouhý 1 036 m, vedoucí skrz kopec. Zásoboval tehdejší hlavní město vodou z vydatných pramenů. Stavba byla realizována v polovině 6. století.

Řím

Štola, vedoucí vodu z Avernského jezera do města Cumae, se nám dochovala a je dodnes průchodná. Štola je 5 km dlouhá a procházela jí i voda z jezera Fucinského. (Obrázek 10)



Obrázek 10: Příčné řezy starověkých štol
a) vodovodní štola v Aténách, b) štola na odvodnění Fucinského jezera
1 – kamenné zdivo
(<http://docplayer.cz/1724870-Podzemni-stavitelstvi.html>)

Nejstarší vodovodní štolou u nás je **Rudolfova štola** v Praze. Přiváděla vodu do královské obory, dnes Stromovky. [21]

- **Kanalizace**

Blízký východ

Důvodem budování kanalizací byl odvod dešťové vody z měst. Posléze se zvyšující se populací nastala potřeba odvedení splaškových vod.

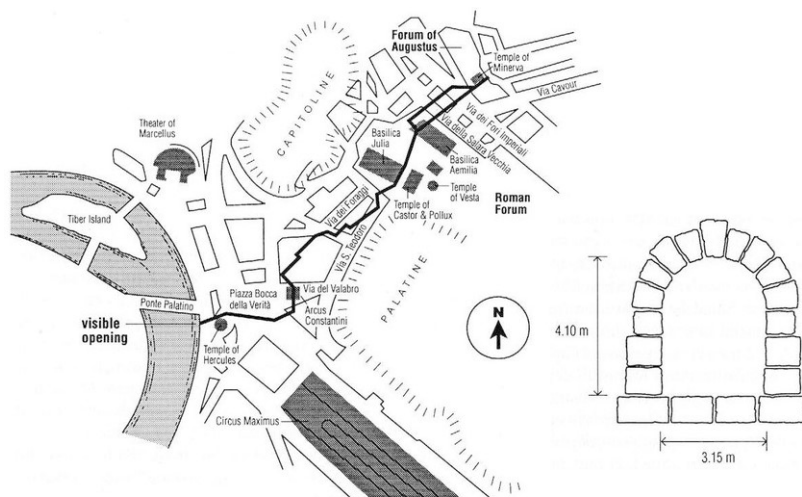
Nejstarší kanalizace můžeme najít ve starobylém městě Babylon (Mezopotamská říše) budované již v roce 4 000 př.n.l. Jednotlivé díly potrubí byly vyrobeny z jílovité hlíny na hrnčířském kruhu a následně vypalovány v pecích. Dílce v průměru 18-36 palců (podle velikosti budov) byly skládány na sebe.

Egypt

Současně se rozvíjela kanalizace i v Egyptě, a to odvodňování pyramid-jejích obřadních místností. Jelikož ke spoustě rituálů byla potřeba očista. Rozsáhlá síť měla vedlejší ramena s jejími přípojkami na hlavní stoku a dále do řeky. Kanalizace jsou datovány od roku 2 000- 500 př.n.l.

Řím

Cloaca Maxima byla velkým kanálem starého Říma, vybudována roku 510 př.n.l. Nejdříve používána pro vysoušení půdy a posléze k odvodu splaškové vody do řeky Tiber. Klenutá konstrukce dosahuje šířky 3 m a výšky 4 m. V roce 800 př.n.l. byly v Římě vybudovány veřejné záchody, které byly využívány širokou veřejností. Odpadní voda z lázní a záchodů byla sváděna do kanalizací a následně vypouštěna do řek. (Obrázek 11)



Obrázek 11: Cloaca Maxima – půdorys vedení kanalizace městem a řez stolou (<http://khs11cityofrome.weebly.com/cloaca-maxima.html>)

Na území dnešní **České republiky** jsou první zmínky o kanalizaci na začátku 14. století. Výrazná výstavba začala až koncem 18. století. [9]

- Podzemní cisterny

Tyto stavby jsou umělé podzemní nádrže (vodojemy), které byly budovány většinou na konci akvaduktu nebo na jeho odbočkách. Sloužily pro zásobování paláců a domácností. Nejznámější cisterny se nachází v Turecku a Itálii.

Cisterna z Philoxenosu se nachází také v Istanbulu a je druhou největší. Cisterna byla postavena pod palácem Antiochos v 5. století. Její půdorysné rozměry dosahují 3 640 m² a může uchovávat až 40 000 m³ vody. Klenutý strop je podporován 224 sloupy, každý 14-15 m vysoký, které jsou vyrobeny z mramoru.

V Itálii se nachází cisterna **Piscina Mirabilis**, do které je přiváděna voda z akvaduktu Serino. Podzemní prostor má plochu 1 800 m² a dosahuje výšky 15 m. Cisterna

je vybudována v tufech a má objem 12 600 m³. **Bazilika cisterna** vybudována v 6. století, je jednou z největších. Nachází se v Turecku pod městem Istanbul (dříve Konstantinopol).

Vstupem do této cisterny je malý zděný domek na náměstí u chrámu Hagia Sofia. Podzemní prostor je široký 65 m a dlouhý 143 m, podporu klenbového stropu tvoří 336 sloupů ve 12-ti řadách. Voda byla velice důležitá a podzemní zdroje byly dobře chráněny před nepřáteli. Dnes je cisterna přístupná veřejnosti. (Obrázek 12) [22]



Obrázek 12: Bazilika cisterna

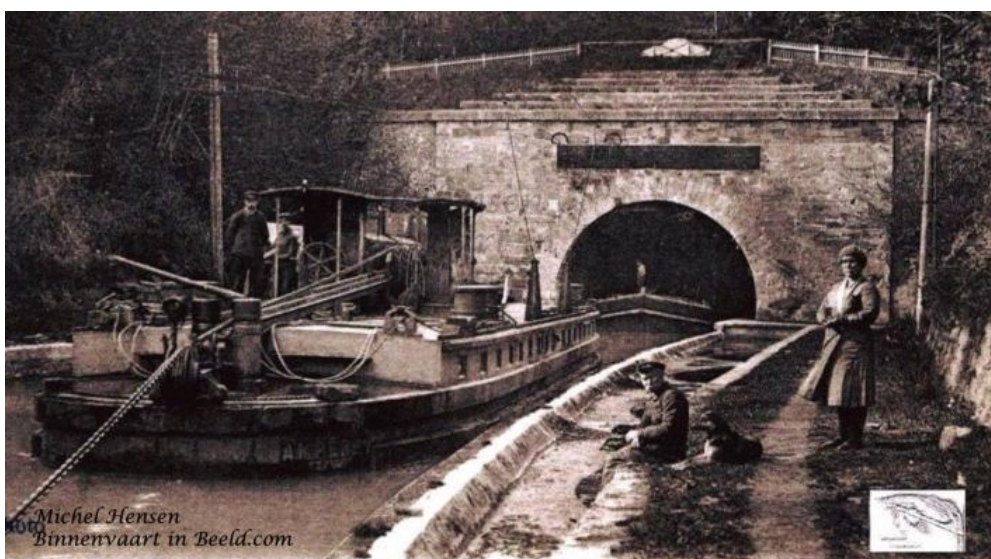
(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/20/Cisterna_Basilica_Junto_a_Santa_Sofia_Estambul.JPG)

- Tunely (plavební, pro pěší, železniční)

Plavební

Průmyslová revoluce, která začala kolem poloviny osmnáctého století, přinesla potřebu přepravy velkého množství těžkého zboží (uhlí, železná ruda, bavlna). Tedy začalo budování plavebních kanálů, aby bylo umožněno propojení splavných řek. Někdy při stavbě kanálu stála v cestě překážka v podobě kopce, bylo lepší vybudovat tunel než kopec obcházet.

Tím nejstarším je **tunel Malpas**. byl vybudován v roce 1681, a to skrz pískovcový kopec d'Ensérune, blízko Béziers ve Francii. Tunel **Harecastle** je první plavebním tunelem v Anglii. Stavba tunelu začala roku 1766 a skončila v roce 1775. Jeho délka je 2 880 m, šířka 9 m a výška 12 m. Tunel se skládá ze dvou paralelních tunelů Brindley a Telford. Dnes je splavný už pouze Telford. S tímto tunelem se spustila tunelová výstavba v Británii ve velkém měřítku. **Riqueval** je francouzský plavební tunel na kanále de Saint-Quentin. Tunel byl vyražen v písčitém podloží roku 1803 o celkové délce 5,67 km. Riqueval je jeden ze tří míst na světě, kde ještě funguje průplav tunelem pomocí řetězových lodí (Obrázek 13). Kanál St. Quentin ve Francii, který byl otevřen v roce 1810, měl dva tunely. Jeden z nich, tunel **Tronquoy**, byl prvním tunelem, ve kterém byly použity dřevěné a kamenné oblouky, aby se zabránilo kolapsu měkké zeminy. Také v Americe začali budovat plavební kanály a jejich tunely. Vůbec prvním tunelem ve Spojených státech byl **Auburn tunel** (Schuylkill Canal) ve státě Pennsylvania. Stavba započala roku 1818 a jeho výstavba trvala 3 roky. Klenutý tunel o délce 137 m protínal masívem červené břidlice. Nakonec roku 1856 byl zcela zrušen (open cut). [29]



Obrázek 13: Riqueval tunel
(https://binnenvaartinbeeld.com/GB/canal_de_saint_quentin/tunnel_riqueval)

Pro pěší

Nejstarší tunel pro pěší je **Sigmundstor** v Salzburgu. Ražba tunelu začala roku 1765 a skončila roku 1774. Byl ražený ve tvrdých jemnozrnných pískách a měří 131 m. (Obrázek 14)

V roce 1825 začala ražba tunelu **Rotherhithe** pod řekou Temží (Anglie). Tento pěší tunel navrhl a postavil Marc Brunel. Vchodem do tunelu byly dvě svislé šachty na každém břehu jedna. Šachta Tower Hill byla budována v hlíně a bez potíží, ale šachta Tooley-streed byla v podloží štěrkovitém a dosti rozvodněném. Na této stavbě byl poprvé použit jedinečný brunelův razící štít. Hlína pod řekou byla velice tuhá, černozeleň barvy, a rychlost ražby v ní dosahovala posunu 2,74 m za 24 hodin. V roce 1869 byl přestavěn na železnici. Tunel funguje dodnes jako část londýnského metra. (Obrázek 15) [29]



Obrázek 14: Tunel Sigmundston (současnost)

(<http://www.staedte-fotos.de/bild/oesterreich~salzburg~salzburg/33776/salzburg---sigmundstor-frueher-neutor-durchfahrt.html>)



Obrázek 15: Výkop tunelu Rotherhithe, asi kolem roku 1840

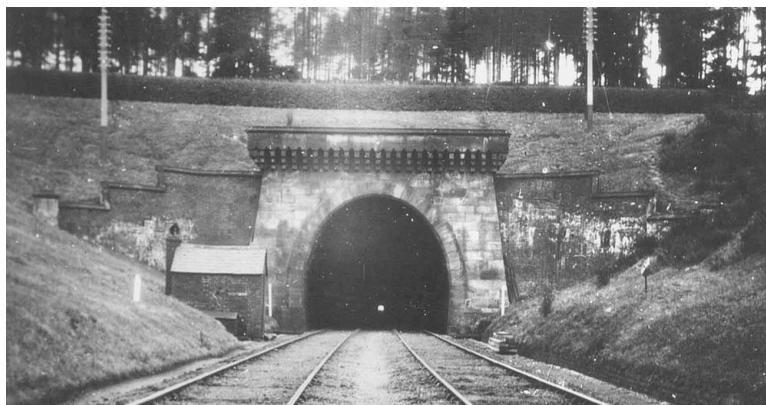
(<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/Thamestunnel1840.jpg>)

Železniční

Vzhledem k tomu, že železniční tratě se šířily ve všech směrech a na všech kontinentech, vznikla řada technických problémů. Jedním z nich byl problém dostat železniční trať přes kopce a hory. Tímto tunelová výstavba získala nový význam.

V roce 1824 ve státě Pennsylvánia byl postaven první důlní tunel Spojených států poblíž města Mauch. **Tunel Hacklebernie** byl veden k dosažení uhelné žíly, ale těžba uhlí nevynášela, proto roku 1827 byla těžba zastavena a tunel byl převeden na železniční. Nakonec byl roku 1846 proražen skrz masiv a jeho konečná délka činila 671 m. **Staple Bend tunnel** ve státě Pennsylvánia, byl postaven v letech 1831 a 1834 pro Allegheny Portage železnici. Tento tunel, dlouhý 275 m, byl prvním železničním tunelem postaveným ve Spojených státech. Byl ražen v břidlici a uzpůsoben pro dvojitou trať.

Tunel Kilsby byl slavnostně otevřen roku 1838 s délkou 2 223 m. Raritou je velikost větracích šachet použitých při jeho konstrukci (Obrázek 16). Cihlové šachty mají průměr 20 m a jsou ukončeny prolamovanými hřebeny. Tento tunel je stále v provozu. (Obrázek 17)



Obrázek 16: Jižní portál tunelu Kilsby s budovou P & W, která byla postavena vlevo. (<http://www.warwickshirerailways.com/lms/lnwrkt3564.htm>)



Obrázek 17. Větrací šachta tunelu Kilsby
(https://www.google.cz/search?q=Tunel+Kilsby&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjPwpy6nM_eAhUEuRoKHYqYDmYQ_AUIDygC&biw=1536&bih=723#imgrc=cbFPGplbHBq66M:)

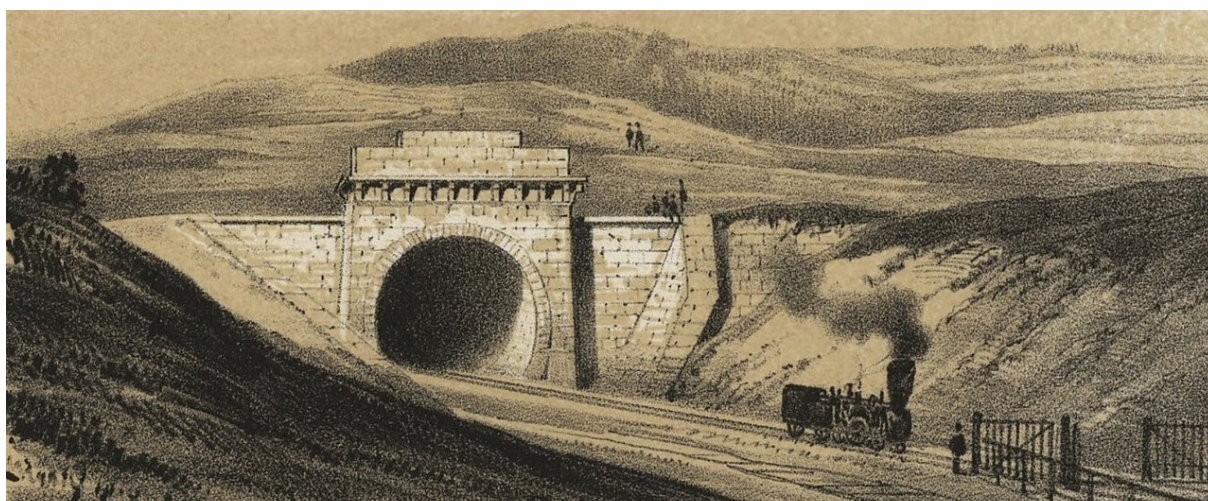
Železniční tunel **Box Tunnel** je ve Wiltshiru na západu Anglie. Navržen a postaven také Marcem Brunelem. Přes kopec navrhl osm svislých šachet pro geologický průzkum. Tunely byly raženy tak zvanou protičelbou a při spojení vznikla odchylka pouze 50 mm. Tunel byl dokončen roku 1841 pro Velkou západní železnici, jeho délka je 2,95 km.

První tunely ve Francii byly postaveny na trati St. Germain v roce 1837. Z raných francouzských tunelů lze uvést **Nerthe**, Arschwiller, Rilly, La Motte, Lormont a Alouette.

V Belgii byl prvním tunelem **Cumptieh tunnel**, postavený v roce 1835.

Tunel Oberau byl prvním tunelem v Německu, postaveným v roce 1839. Tunel byl ražen v břidlici a žule, jeho celková délka je 513 m. Maximální nadloží nad tunelem je až 15 m.

Jedním z nejstarších českých železničních tunelů je **Třebovický**, zprovozněný roku 1845 na trati Praha-Olomouc (Obrázek 18). Stavba nebyla ražena, ale hloubena. Jeho výstavbu i provoz provázely geologické problémy. Délka tunelu byla 512,53 m. Tunel se nacházel v směsi jílu a mokrých písků. Ovšem v roce 2005 tunel dosloužil a byl zasypán. **Krasíkovský (Tatenický)** tunel se datuje také do roku 1845 jako tunel Třebovický, je dvoukolejný a dlouhý 145,8 metrů. Jeho opěry a spodní klenba je z kamene, vrchní klenba z pálených cihel. Tunel byl hlouben a po dokončení byla klenba zasypána. Tloušťka nadloží je 0,63 až 2,84 metru. Dosloužil v roce 2004, kdy byl opuštěn a nahrazen novým. **Blanenské tunely** jsou součástí železniční trati Brno – Česká Třebová. Stavba trati byla zahájena roku 1843 a uvedena do provozu roku 1849. Bylo vybudováno celkem 10 tunelů o celkové délce 1772 m. V současné době se zde nachází 9 tunelů, ten desátý byl nahrazen zářezem. Tunely prošly rekonstrukcemi, ale fungují dodnes. V roce 1856 bylo v Anglii více než 55 tunelů a ve Francii 20.



Obrázek 18: Třebovický tunel v roce 1845
(https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99ebovick%C3%BD_tunel#/media/File:Tunnel_bei_Triebitz_1845.jpg)

Metro

První **metro** na světě bylo v **Londýně**. S výstavbou se začalo v roce 1860 a v roce 1863 otevřeli první linku. Tato trať měla délku 6 km, následně v roce 1884 přibyl okruh délky 20 km. Následně se trať dále rozvíjela v podzemí i na povrchu (Obrázek 19). Dalším městem je **New York**, trať zde byla otevřena také v roce 1863. V **Budapešti** roku 1896 otevřeli okruh metra o délce 10 km. Výstavba postupovala velice rychle, napomáhaly k tomu dobré geologické podmínky a nízké založení celé stavby. [28]



Obrázek 19: Fotografie Henryho Flathera, ukazuje výstavbu železničních tratí Metropolitan District Railway, která se uskutečnila mezi lety 1866 a 1870 a která zahrnovala i zničení domů (<https://www.dailymail.co.uk/news/article-2259177/London-Underground-Amazing-images-houses-demolished-Tube-1863.html>)

2.4. Militaristická díla

Ve středověku se budování tunelů a vodovodních štol zastavilo. Od počátku 13. století při budování hradů a zámků začaly vznikat únikové chodby a obranné prostory. Chodby mohly být například tajné, šlechta jimi z hradu unikala před nepřáteli a jiným nebezpečím. Některé chodby jsou ve skále hrubě raženy ba přímo vylámány. Jiné budovány pracně pomocí pouhých dlátek a kladiv. Alternativou únikových chodeb jsou odvodňovací štolky. No, a význam některých chodeb zůstává stále záhadou. Snad v každém větším městě najdeme podzemní chodby.

Největší komplex chodeb je ve **Znojmě**. Zatím bylo objeveno kolem 30 km chodeb. Budování chodeb začalo ve 14. století. Sloužily pro ukládání potravin, popřípadě jako úkryt pro obyvatele při vpádu nepřátel. Právě v roce 1645 kdy bylo Znojmo obléháno vojsky, se lidé ukrývali v podzemním labyrintu. Chodby byly 80 cm široké a maximálně 170 cm vysoké. [16]

2.5. Podzemní lomy a báňská díla

- Podzemní lomy

V **České republice** se kámen a písek odedávna těžil na povrchu, ale málokdo ví, že existují i podzemní lomy. V okolí Lipna můžeme nalézt ložisko na těžbu **vápence**. Vápenec byl na místě mlet na prášek a posílán do zahraničí jako pudr nebo zásyp na rány. V okolí Českých Budějovic v roce 1850 zde začala těžba **kaolínu**, ovšem netrvala moc dlouho, jen do roku 1898. Lom byl dobýván takzvaným chodbicováním, je zde 6 km chodeb. V okolí Mělníku byla těžena **opuka**. Dnes je známo asi 6 podzemních komor, z nichž největší má rozměry 60x80 m a je podepřena pilíři. Těžena zde probíhala pomocí klínů, hornina byla vytahována ven a upravována na kvádry. V kopci nedaleko Nového Boru se nachází **pískovcový lom**. Výška chodeb dosahovala až 8 m. Pískovec byl použit na stavbu železniční trati a část byla použita v místních sklárnách.

Ve **světě** se podzemní lomy nachází například v Paříži. První dolování zde začalo kolem roku 1000. Dlouhá staletí lom dodával **vápenec** na pařížské stavby. V 17. století po zveřejnění vyhlášky, že všechny hrázdné domy musí mít sádrovcovou omítku, vznikla rozsáhlá těžba **sádrovců**. Dnes je většina pařížských lomů zasypána. [7]

- **Báňská díla**

Získávání nových surovin z hlubin země. Archeologové se domnívají, že nejstarší doly jsou na Moravě, a to ve stáří 9400 let, starší doly se našly pouze v Egyptě. U Moravského Krumlova se těžil rohovec, který sloužil k výrobě pazourků. Pravěcí horníci razili svislé šachty, které se v hloubce 2-4 metrů rozšiřovaly a vycházely z nich další chodby. V **České republice** se od 8. století těžil cín, zlato, posléze i stříbro. První místa těžby jsou Rychlebské Hory (zlato), Kutná Hora (stříbro). Od 14. století byla dobývána železná ruda. První písemná zmínka o dobývání uhlí z roku 1403 je z města Duchcova. V roce 1701 nejstarší záznam o těžbě rtuti v Nižné Slané.

Také ve **Světě** je nespočet dolů. Solný důl Wieliczka (Polsko) byl v provozu od 13. do 21. století a to nepřetržitě. Také byl zařazen na seznam světových dědictví UNESCO. Důl bývá nazýván jako solná katedrála, jelikož ve svých útrobách skrývá sochy, velké síně a kapli, to vše ze soli. Na seznamu UNESCO se také objevily černouhelné doly na území Valonska. Což je komplex čtyř dolů na území Belgie. Nejstarší z nich Grand Hornu vznikl na začátku 19. století. Nyní patří k nejlepším architektonickým pozůstatkům průmyslové éry. [4]

3. Metody a nástroje výstavby

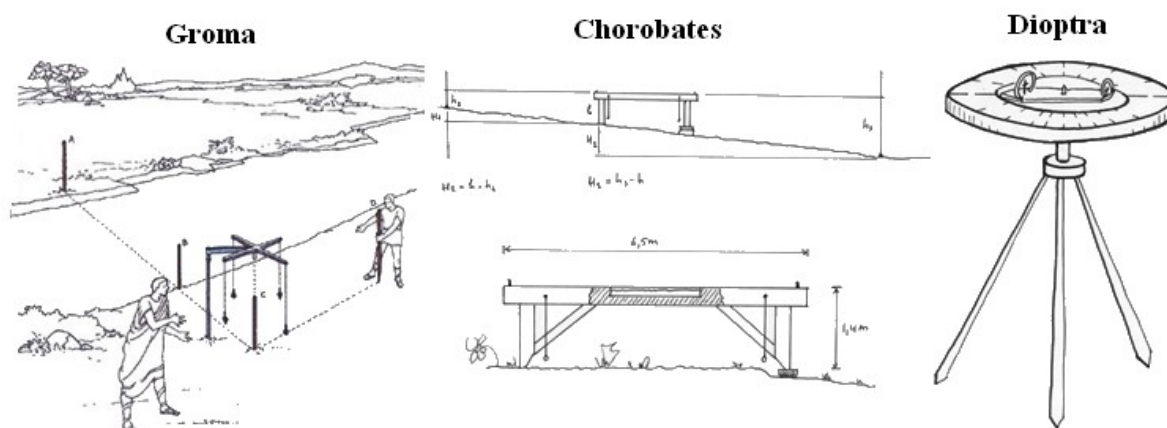
V této kapitole jsou rozebrány geodetické nástroje, které byly použity při vyměřování staveb. Dále je popsán rozvoj techniky a strojů potřebných pro hloubení či ražbu. Drtivá většina starobylých tunelů byla ražena ve skále až do konce 17. století, kdy se začalo uvažovat nad ražbou tunelu pod řekou Temží v Londýně. Kdykoli se objevila špatná nestabilní půda, používalo se různých technik vyztužování díla. Před rokem 1880 záleželo jen na úsudku a zkušenostech vedoucího stavby. Nebyly k dispozici žádné analytické metody ani modely pro daný typ půdy. Shrnutí použitých nástrojů a technik najdeme v příloze **tabulka 2**. V tabulce je uveden vynález a zařazen do časové osy.

3.1. Nástroje sloužící k vytyčení stavby

V této kapitole jsou popsány primitivní, avšak účinné nástroje, které historičtí stavitelé používali.

Zařízení zvané **Groma**, se umístilo nad vrchol (roh) pravého úhlu. Cílením přes vlákna na konci ramen byl vytyčován pravý úhel. Groma byla jedinou úhloměrnou pomůckou, kterou Římané měli. Byli schopni vytyčovat i složité úhly ke stavbě kruhových či elipsovitých staveb. **Chorobates** je druh nivelační pomůcky připomínající lavici. Dřevěný hranol s rýhou, v němž byla voda, se postavil do vodorovné roviny. Na obou koncích byl opatřen hledáčkem, kterým se promítala rovina do dálky. Velikost Chorobaty se pohybovala od decimetrů až po metry. **Dioptra** původně byla určena k měření polohy hvězd. Přístroj je podobný teodolitu, který se datuje do 16. století. Přesnější verze gromy. Dioptra byla použita k vyměřování Eupalinova tunelu. **Olovnice** byla a je jednoduchá pomůcka, která se používá dodnes. Skládá se ze závaží zavěšeném na provázku a slouží k měření svislých délek. Takzvané **Haperdonapté** (napínání lan) vychází z Pythagorovy věty. Jde o pravoúhlý poměr stran 3:4:5, pomocí kterého se určovaly pravé úhly. Na laně se udělalo několik uzlů ve stejné vzdálenosti, poté se lano napnulo v pravoúhlý trojúhelník o přesném poměru stran. (Obrázek

X) [23], [12]



Obrázek 20: Historické geodetické nástroje
(<http://www.romanaqueducts.info/technicalintro/surveyingtools.htm>)

3.2. Historické nástroje a metody k rozpojování hornin

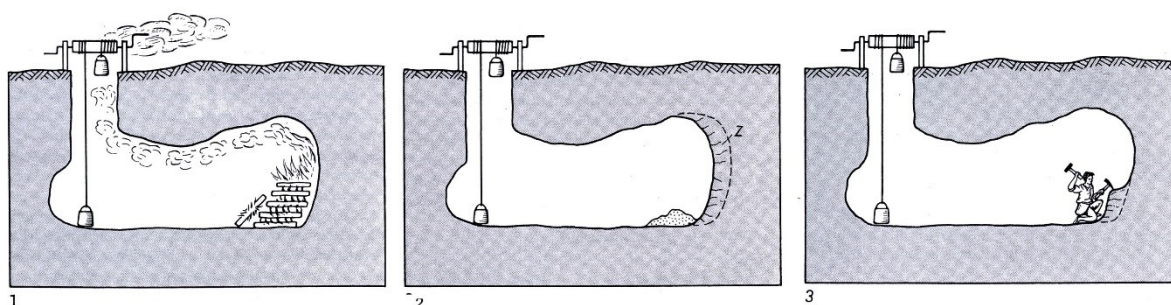
V **době kamenné** používali dělníci hlavně kámen, a to v podobě kladiv, škráadel, nožů. V **době bronzové** byla využita slitina mědi a cínu. Z bronzu se vyráběly nástroje jako dláta, sekery, nože. V **době železné** se k ražbě používalo **želízko a mlátek** (Obrázek 21). Postup ražení byl pracný a pomalý. Za šest hodin se vyrazilo zhruba 2,5 cm štoly o průřezu 2 m na výšku a 1 m na šířku. Také z toho důvodu se štoly razily jen na průlezný profil. Tato razicí technika se poznala podle charakteristických rýh na stěnách chodeb, takzvaných křesaníc. Pomocí želízka a mlátka se razilo až do poloviny 18. století.

Níže uvedené metody umožnily dělníkům snadněji rozpojit horninový masiv a rychleji pokračovat v ražbě děl. Technika **klínování** spočívala v zarážení klínů do puklin. Pukliny mohly být přírodní nebo předem vysekané. Nejprve to byly klíny dřevěné, ty byly zaraženy a následně polévány vodou. Dřevo se rozpnul a horninový blok odlomilo. Tato technika se používá dodnes, ovšem klíny jsou již z jiného materiálu.

Technika **sázení ohně** (žárové dobývání) spočívala v rozpálení horniny pomocí dřevěných hranic. Když byla hornina dost rozežhřátá, polila se studenou vodou (Obrázek 22). Prudké teplotní změny způsobily pnutí v masívu a následné popraskání masívu, poté bylo dobývání jednodušší. Máváním velkými listy nebo kusy látek u ústí šachty, zajišťovali větrání. [5]



Obrázek 21: Mlátek s želízky – historické nálezy
(<https://vmfoto.nolimit.cz/rubriky/galerie/hornicke-artefakty/unnamed-3>)



Obrázek 22: Technika sázení ohně
(<http://www.stolajohannes.cz/cs/stola/zpusob-dobvani.html>)

3.3. Od černého prachu k dynamitu

Černý prach, vynález z Číny (9. století), se vyráběl rozmělnováním a míšením surovin ve zvláštních prašných mlýnech (stoupách). Stály v Radvani u Banské Bystrice nebo v okolí Kutné Hory. Tyrolský horník Kašpar Weindl 8. ledna 1627 poprvé použil černý prach na rozpojování hornin, a to v Banské Štiavnici. Vynález se rychle rozšířil. Horníci ručně vysekávali pouze díry pro nálože, místo pomalé celoplošné ubírky pomocí železa a mlátku. Díry o průměru asi jednoho palce a hloubce 40 cm se nabíjely do poloviny střelným prachem a utěsnily hlinou nebo jinou měkkou horninou. Následně se do nálože (ponechaným otvorem) vložila zápalnice, která byla přichystána pro odstřel. Po zavedení jílové ucpávky, přišel pan **Bickford** v roce 1831 s jeho vynálezem zápalné šňůry. Bezpečnost této zápalnice spočívá v odpálení náloží v požadovaném čase. Zápalnice byla složena z tenké žíly střelného prachu, obalené bavlnou nebo konopím. Rychlost hoření zápalnice bylo 1 cm za 1 min.

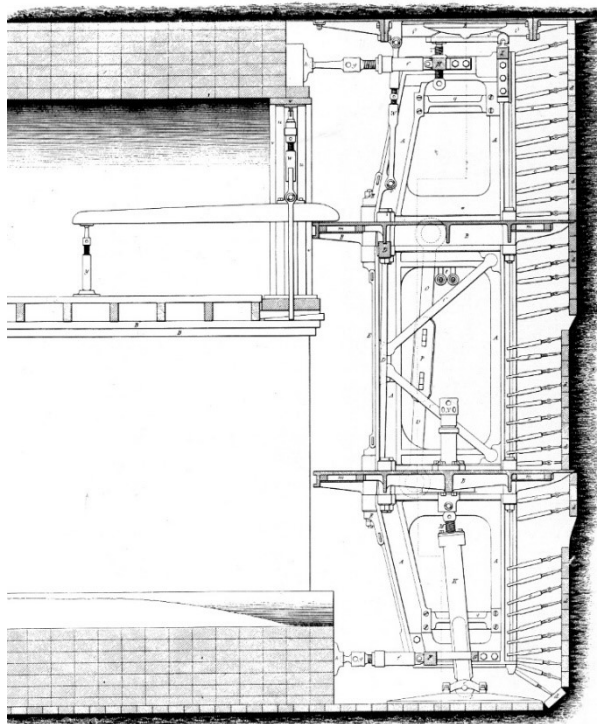
Trhací černý prach byl později nahrazován mnohem výkonnějším **Nitroglycerinem**. Nitroglycerin je olejová, bezbarvá až nažloutlá kapalina, která velmi snadno exploduje (teplem nebo nárazem). Byl objeven italským chemikem v roce 1847, ovšem uběhlo téměř 15 let, než byl poprvé použit k trhacím pracem. Výbušná nálož (vkládaná do dutiny) měla obal zinkové trubice, naplněné střelným prachem a zalité nitroglycerinem. Ovšem jeho bezpečnost stoupla až s vynálezem dynamitu.

Dynamit patentován roku 1867 švédským průmyslníkem Alfredem Bernhardem Nobelem. Nalezl způsob, jak využít obrovského trhacího účinku nitroglycerinu a přitom snížit jeho nebezpečnou výbušnost. Zkombinoval nitroglycerin s hlinkou, v níž se tekutina velice dobře vsákla. Sestrojil také rozbušku, která přivede kusy dynamitu k detonaci. Muselo se dbát na to, aby rozbuška byla vložena do středu nálože, a aby vodiče dosahovaly až ven z nálože. Dále se volné konce vodičů jednotlivých náloží spojily a volný konec první a poslední nálože se dovedly až k roznětnici. **Elektrická iniciace** náloží byla používána v polovině 19. století. Byly dva způsoby detonace. Jeden z nich spočíval v rozžhavení jemného platinového drátu (železa nebo legovaného kovu) elektrinou z voltové baterie. Druhý způsob závisel na náhlém vypuštění statické energie mezi svorky dvou drátů, použity byly přístroje jako třecí elektrický stroj, indukční cívka, elektrodynamický stroj. Statická elektřina se ukázala jako nejvhodnější a nejrychlejší způsob iniciace. Tento způsob iniciace můžeme použít jak u detonace černého prachu, tak u vyšších výbušnín. První stavbou za použití elektronické iniciace byl tunel Hoosac v USA (1851-1875). Od roku 1870 byl dynamit také u nás.

Jako jeho další vynález lze jmenovat také **trhavou želatinu**. Je vyrobená z nitroglycerinu a střelné bavlny. Patentována v roce 1867. [29]

3.4. Od vrtáku k razicímu stroji

Marc Brunel v roce 1818 poprvé zkonstruoval **razicí štít** (Obrázek 23). Byl poháněný lidskou silou a chránil horníky před zavalením během zdění klenby. Brunelův štít byl velký obdélníkový rám, postavený uvnitř tunelu. Čelba byla vertikálně i horizontálně rozdělena na 36 sekcí, v každé sekci pracovali tři horníci. Celá konstrukce byla opírána a posouvána již o hotové ostění tunelu.

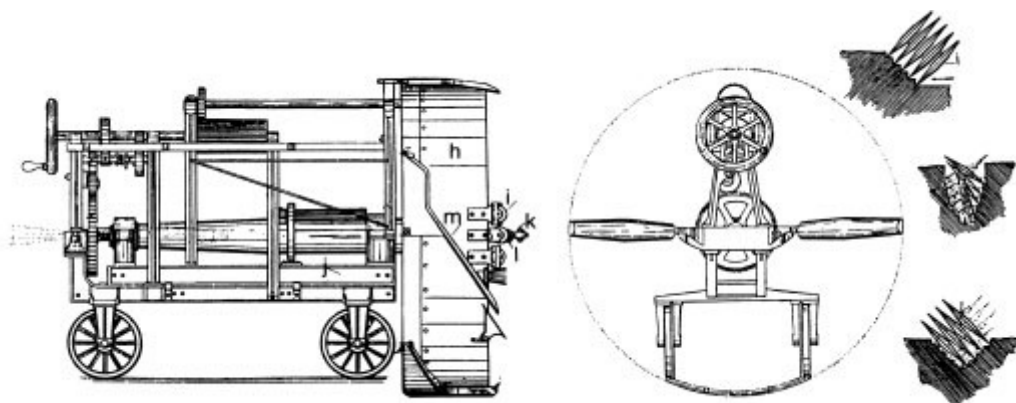


Obrázek 23: Brunelův razicí štít
(http://www.ajhw.co.uk/books/book449/book449.html#Page_221)

Nejprve byly vrtačky poháněny ručně, následně pak stlačeným vzduchem. První vrtačka poháněná parním strojem byla patentována v roce 1849 panem J.J. Couchem.

S rozvojem techniky byly vynalezeny i velké stroje, jako stroj navržený v roce 1851. Měl vyřezat drážku kolem obvodu tunelu, následně jádro bylo odstraněno klasicky pomocí trhacích prací.

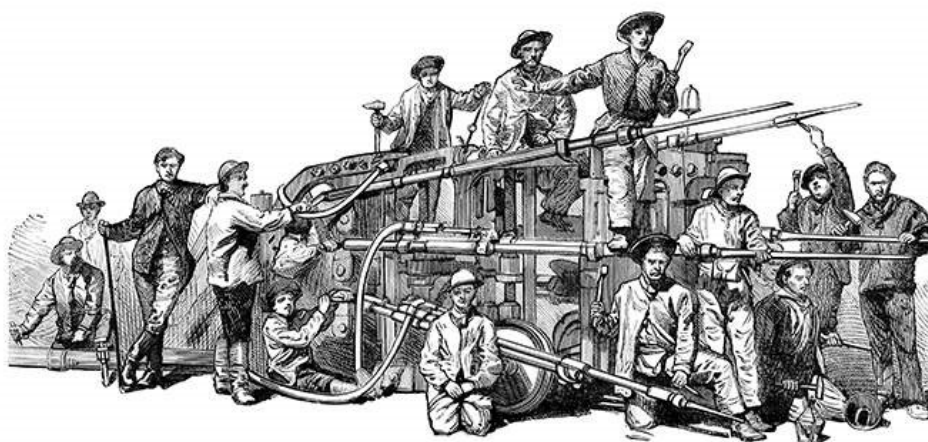
Stroj sestrojený Američanem Charlesem Wilsonem měl všechny charakteristiky moderního **TBM**, nechal si ho patentovat v roce 1856 (Obrázek 24). Vrtná rotující hlava stroje byla opatřena kotoučovými řezačkami, které Wilson vyvinul a patentoval v roce 1857.



Obrázek 24: TBM od C. Wilsona
(<http://wiley-vch.e-bookshelf.de/mobile/products/reading-epub/product-id/602705/title/hardrock+tunnel+boring+machines.html>)

Vzduchové kompresory na principu stlačeného vzduchu byly použity v roce 1861 při výstavbě tunelu Mt. Ceniz a v Americe na tunelu Hoosac jako pohon vrtaček.

V roce 1862 byla navržena první **diamantová vrtačka**. Během hodiny a půl vrtačka uměla vyvrtat díru o průměru 5 cm a hloubky 38 cm, a to do tvrdé žuly. Byla využívána těžebním průmyslem i na vyvrtávání děr pro nálože. Dále pak byl navržen a zkonstruován **vrtací stroj** poháněný stlačeným vzduchem (Obrázek 25). Měl za úkol vyvrtat řadu otvorů do horniny pro nabití trhavinou. Stroj byl použit na tunelu Fréjus (známého jako tunel Mount Ceniz). Otvory měly průměr 4 cm a hloubku 32 cm. Vrtací práce začaly v roce 1861. Tunel měl původně 12,8 km a razil se 14 let. [27]



Obrázek 25: Ferroux Boring Machine
(<https://www.oldbookillustrations.com/illustrations/ferroux-boring-machine/>)

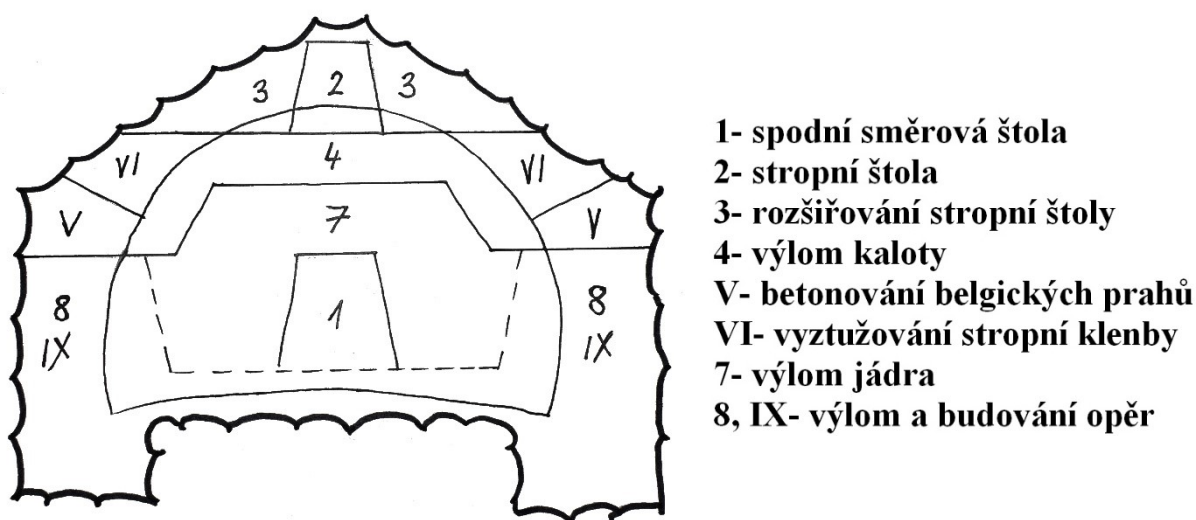
3.5. Klasické tunelovací metody

Při budování tunelů v měkkých horninách, začal rozvoj klasických tunelovacích soustav. Tyto metody byly poměrně pracné, pomalé a vyznačovaly se velkou spotřebou dřeva. Provizorní výztuž tvořila výdřeva a definitivní výztuž obezdívka. Používání klasických metod bylo na našem území ukončeno v polovině 20. století.

Ražba byla prováděna pomocí **dílčích výlomů**. Čelba je rozdělena do sektorů, které se postupně odtěžují a vzniklý prostor je zajišťován nejdříve dočasnou a následně trvalou (definitivní) výztuží. Jsou dva systémy dočasného vyztužování. Příčnickové (hlavní nosné prvky jsou v příčném směru) a podélníkové (hlavní nosné prvky jsou v podélném směru, rozepře rozpěrami). Níže je popsán postup vyztužování u jednotlivých soustav. Tyto soustavy se od sebe liší především schématickým pobíráním (pořadím otevírání dílčích výrubů). [24], [3]

- Belgická soustava

Tato metoda se nazývá podchycovací. Belgický systém pocházel z výstavby tunelu na kanálu z Charleroy do Bruselu v roce 1828. Následně byla tato metoda použita na tunelech Mont Cenis a St. Gothard. Na obrázku (Obrázek 26) je znázorněno pobírání výlomu a zdění definitivního ostění.

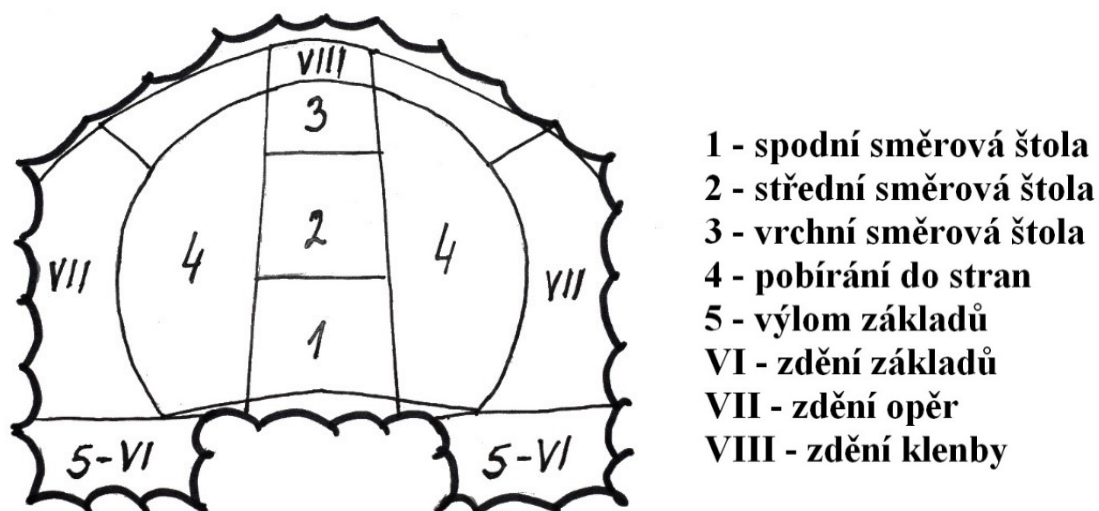


Obrázek 26: Belgická soustava
(předloha:

<http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/2018/YPZU/Prednaska%20A%20Tunelovac%C3%AD%20metody%20Uvod.pdf>)

- Anglická soustava

Základy této metody se použily na železničním tunelu Edge Hill v Anglii na trati Manchester – Liverpool v roce 1830. Soustava je podobná rakouské, jen se vystrojuje dlouhými stojkami na celou výšku výrubu. Na obrázku (Obrázek 27) je znázorněno pobírání výlomu a zdění definitivního ostění.



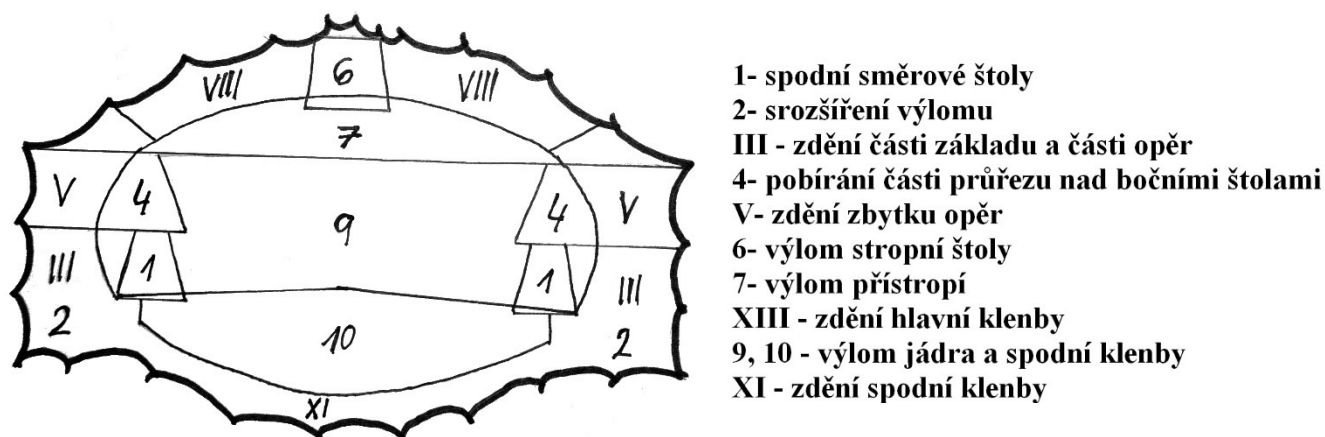
Obrázek 27: Anglická soustava

(předloha:

<http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/2018/YPZU/Prednaska%20A%20Tunelovac%C3%AD%20metody%20Uvod.pdf>)

- Německá soustava

Soustava tzv. jádrová byla například použita na tunelu St. Aignan, na kanále Ardennes v roce 1822. Na obrázku (Obrázek 28) je znázorněno pobírání výlomu a zdění definitivního ostění.



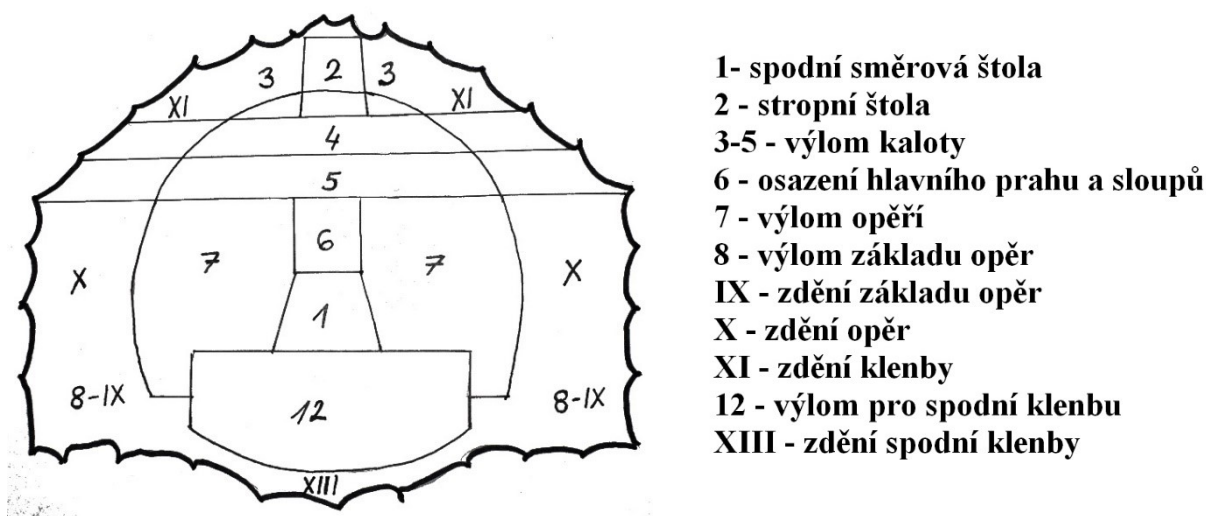
Obrázek 28: Německá soustava

(předloha:

<http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/2018/YPZU/Prednaska%20A%20Tunelovac%C3%AD%20metody%20Uvod.pdf>)

- Rakouská soustava

Nejstarší metodou je **stará rakouská metoda** (příčnickové uspořádání). Použita poprvé v roce 1839. Budování začíná vyražením směrové štoly, která je vystrojena vřeřovou výztuží, dále je doplněna polygonovým příčným pažením. Definitivní výztuž byla konstruována až po úplném dokončení výlomu v příslušném páse. Systém výdřevy se postupně zdokonaloval, a tak zvaná **rakouská metoda modifikovaná** v podélnicovém uspořádání výdřevy se stala na více než 100 let nejpoužívanější klasickou tunelovací metodou. Na obrázku (Obrázek 29) je znázorněno pobírání výlomu a zdění definitivního ostění.



Obrázek 29: Rakouská soustava
(předloha:

<http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/2018/YPZU/Prednaska%20A%20Tunelovac%C3%AD%20metody%20Uvod.pdf>)

3.6. Odkliz a vyztužování

- Odkliz

Rubanina se ze štol odklízela ručně v proutěných koších, neckách nebo kolečkách, poté vědrem vytahována na povrch pomocí **vrátků** (rumpálů). Vrátky byly ruční a na provoz bylo potřeba 2 až 3 mužů, dosahovaly do maximální hloubky 60 metrů. Ve 13. a 14. století jsou vyvinuty **žentoury** a byly používány až do konce 16. století. Ty měly pohon ruční, ale i koňský. Koňský žentour dosáhl do těžební hloubky 200 metrů. Posléze byly žentoury poháněny vodní silou a těžili do hloubky 600 metrů. Později při stavbě delších tunelů, byly zřizovány kolejiště s vozíky, ve kterých se rubanina odvážela ven z díla. [5]

- **Vyztužování**

Díla byla prvně vyztužována především dřevěnou výztuží. Ražba probíhala na **plný průřez** (porubem), což je vhodné u děl malého průřezu v pevnějších horninách. Hlavní stavební konstrukcí byl dřevěný rám takzvaná **veřej**. Skládá se ze dvou stojek a stropnice. Prostor nad stropnicí byl zakládán dřevem a vyztužen hlušinou. Výztuže také při zvýšeném tlaku nadloží varovaly havíře před možným kolapsem, a to praskáním dřeva.

Výztuž dělíme na dočasnou, která byla dřevěná. Definitivní, kterou tvořila většinou kamenná nebo cihelná obezdívka tunelu. [5]

3.7. Větrání a odvodnění

Nejčastěji bylo používáno **větrání přirozené**, které je založeno na rozdílu tlaku vzduchu vzniklé rozdílem teplot. Byly zřizovány otvory nebo šachty k přívodu a odvodu vzduchu. **První ventilátory** byly poháněny ručně či vodními nebo větrnými lopatkovými koly. Jeden z typů ventilátorů byl velice jednoduchý, skládal se z dřevěných lopatek na otočném kole. Foukáním větru se ventilátor roztočil a vháněl čerstvý vzduch do šachty. Další typ přivádí vzduch do podzemí pomocí sudu. Čerstvý vzduch vnikal do sudu opatřeného kormidlem (pomáhalo k otáčení sudu po směru větru) otvorem ve stěně. Dále vzduch pokračoval svisle do šachty. Posléze se využívalo kompresorů (pracujících na principu stlačeného vzduchu) k přivádění vzduchu do tunelu. Objevem a uplatněním parního stroje později elektromotoru, se větrání zefektivnilo. [29]

Horizontální díla jako jsou tunely byly budovány ve sklonu a voda mohla gravitačně odtékat. U **vertikálních** děl (šachty) v období hluboké těžby se razilo tak hluboko, dokud nezabránila ražbě podzemní voda. Poté se zřizovaly **dědičné štoly**, které se razily co nejnižší v údolí, aby se na kopci v hlavní štole mohlo razit co nejhlouběji. Odvodnění šachty fungovalo na principu gravitačního odvodnění. Odvodňovací štoly se dědily z generace na generaci, odtud dědičná štola. Pokud nebylo možné šachtu gravitačně odvodnit, vybírala se voda stejnou cestou jako rubanina. K vynášení vody na povrch se používaly velké kožené vaky. Později voda čerpána pomocí pump.

4. Reprezentační příklady

4.1. Tunel Eupalinos

- Historie

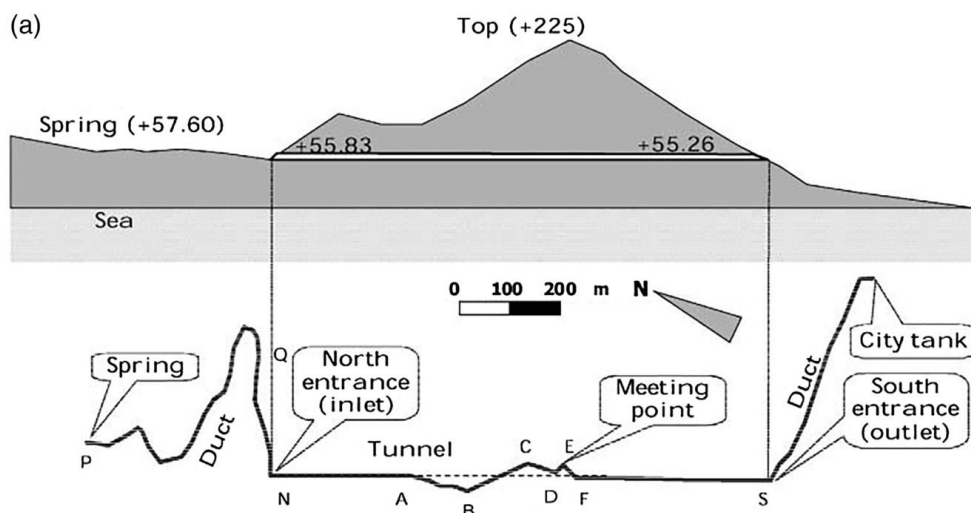
Tunel se nachází na ostrově Samos v Řecku. V 6. století př.n.l. starobylé město Samos, dnes Pythagororio, prožívalo období prosperity. Také vzrůstal počet obyvatel a zdroje vody nestačily. Proto tedy vládce Polykrates najal inženýra Eupalinina z Megary, aby vybudoval akvadukt. Byla to první velká inženýrská stavba. Odhaduje se, že tunel dodal městu 400 m³ vody za den. Tunel byl používán více než 1000 let. Pak byl zapomenut, ale kolem roku 1853 byl znovu nalezen akvadukt a v roce 1973 byl odkryt celý tunel.

- Budování díla

Eupalinos při budování akvaduktu zvolil velice obtížnou cestu vedení vody, a to skrz horu Mount Kastro. Podloží je tvořeno převážně z vápenců, místy z břidlic. Bylo to poprvé, kdy byl tunel prokazatelně ražen protičelbou z portálů jako vodorovný. Tunely se setkaly s obdivuhodnou přesností jak v horizontálním, tak vertikálním směru. Při samotném plánování tunelů, použil Eupalinos známé geotermické principy. Mezi měřičské nástroje můžeme jmenovat chorobátes, horizontální prkna, groma, dioptra. Pro určení polohy portálů na svazích hory, byly použity dřevěné sloupky. Sloupky měly znázorňovat trasu tunelu, přenesenou na povrch. Pro měření přímek a úhlů byl použit chorobates a dioptra. Pro ověření svých výpočtů Eupalinos vykopal šachtu, která byla prodloužením jednoho z měřičských sloupků. Vertikální šachta byla ve vzdálenosti 40 m od severního portálu a shodovala se přesně s tunelem pod ní.

Dále při budování tunelu v horizontální rovině, musel osy obou tunelů upravit a to 35 m před prorážkou, jelikož narazili na problémy v geologických vrstvách. Pravděpodobně kombinace volné horniny a vody.

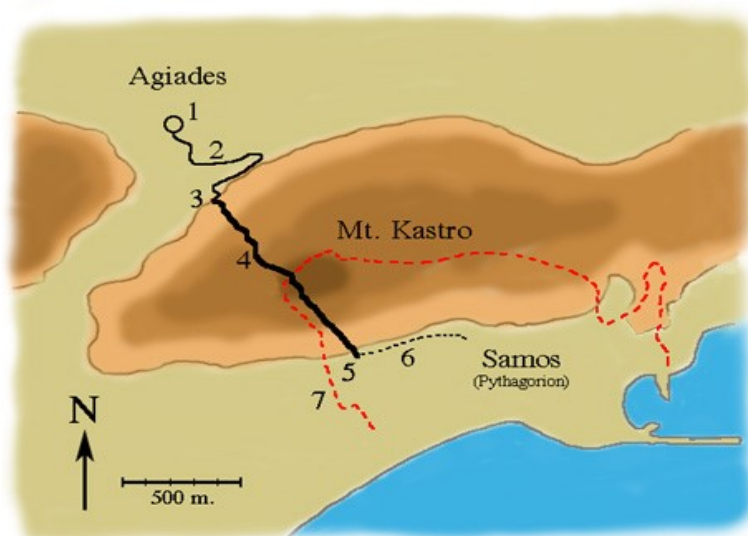
Eupalinos věděl že existuje možnost odchylky. Rozšířil tedy nedaleko prorážky výšku obou tunelů. U jednoho zvýšil výšku klenby a počvu zachoval konstantní a u druhého prohloubil počvu. Ovšem opatření byla zbytečná. Jeho výpočty byly tak přesné, že odchylky byly minimální. Ve vertikálním směru činila 0,04 m a v horizontálním 0,7 m. (Obrázek 30)



Obrázek č.30: Řez a půdorys trasy viaduktu
(<http://ws.iwaponline.com/content/ppiawastws/16/5/1159/F4.large.jpg>)

• Technické parametry

První část viaduktu začíná jímáním pramene v kamenném domku 55 m.n.m (Obrázek 3)(1). Dále pokračuje většinou otevřeným příkopem 690 m dlouhým a průměrným spádem 0,05% (2). Navazuje úsek 150 m dlouhý, dobývaný hornickým způsobem. Šachtami hlubokými až 15 m a vzdálenými 30-50 m (3). Následně voda vtéká do tunelu pod horou, který je dlouhý 1,03 km a vytéká na druhé straně (4). Dále pokračuje pod zemí ve štole, zhotovené stejně jako úsek před tunelem (5). Odtud byla voda vedena v kanálech a trubkách do města, kde byla uložena v nádržích.



Obrázek č.31: Půdorys trasy viaduktu s vyznačenými trasami
(<http://www.samostour.dk/index.php/places-a-tours/special-reports/eupalinos-tunnel>)

Tunel je dlouhý 1,03 km, severní (vtoková) větev tunelu je o 200 m delší než větev jižní. Jeho šířka je 1,8 m a výška 1,8 m. Tento prostor sloužil jen pro výstavbu a provozní údržbu samotné rýhy pro vedení vody. Dno rýhy široké 0,6 m se spádem 0,4 % je 3,5 - 8 m pod počvou tunelu. Rýha je místy zakrytá deskami, ale v nejhlubších místech byla ražena hornickým způsobem, jako štola, pro dosažení vyššího spádu. V některých částech akvaduktu je výška jen 1,5 m a šířka pouhých 0,42 m. Dnes tunel slouží jako turistická atrakce (Obrázek 32). [2], [11]



Obrázek 32: Pohled do tunelu Eupalinos
(https://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel_of_Eupalinos)

4.2. Rudolfova štola

Štola je technické vodní dílo, které je unikátní nejen u nás. Rudolfova štola dodnes slouží svému účelu, a to k napájení rybníků ve Stromovce (Praha).

- Historie

Přemysl Otakar II. nechal v roce 1268 vybudovat královskou oboru. Ferdinand I. jí nechal vyměřit, celý areál tehdy měřil 84 hektarů. V roce 1547 byl zřízen rybník pro tamější lovné vodní ptactvo, ale jen jako deštný. Štola se nazývá také Belvedérská, jelikož se rozkládá na kdysi Belvedérské výšině, dnešní Letná. Císař Rudolf II. v roce 1583 přikázal vybudovat umělé přivádění vody do obory. Tímto úkolem byl pověřen vrchní královský hormistr Lazar Ercker a důlní měřič Jiří Oeder. Dále na díle pracovali havíři z Kutné Hory. Nástroje byly jednoduché, a i proto je dílo obdivuhodné. Z tohoto důvodu pak stoupl v oboře počet zvěře lovné i nelovné.

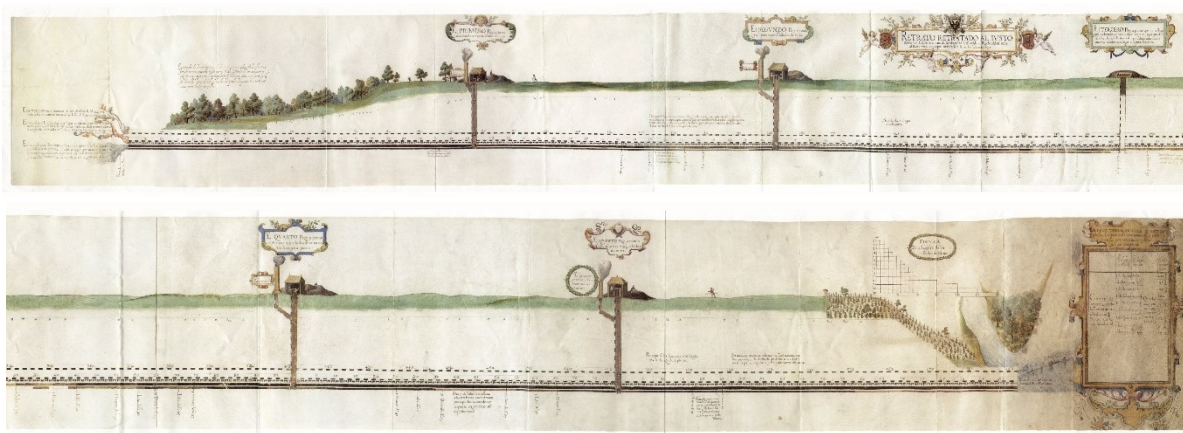
Obora byla několikrát zničena v období válek. Kolem 18. století ztratil vídeňský dvůr o oboru zájem. Obora byla proměněna z větší části na pole a rybník byl vypuštěn. Až za Karla Rudolfa Chotského v roce 1804 se obora znovu proměnila v takzvaný libosad. Pražané zde mohli volně chodit a užívat si pohledu na různé vodopády, vodotrysky a vodní plochy. Zavlažování zajišťovala opravená Rudolfova štola. Voda byla čerpána čerpacím zařízením, které bylo poháněno kolem o průměru 4,8 m. Voda byla čerpána do výšky 40 m do vodojemu z kterého se voda samospádem rozváděla po oboře.

- Budování díla

Po vyměřování byla zahájena stavba na jaře roku 1584. Jako první se vyhloubilo pět svislých šachet až na hloubku budoucí štoly. To proto, aby se mohlo pracovat na dvanácti čelbách jdoucích proti sobě. Problémy při hloubení dělala hornina, ale také přívaly vod. Kvůli těmto přívalovým vodám musela být již 15 m hluboká šachta zasypána a tímto se celá stavba značně zpomalila. V zbývajících 4 štolách se havíři dostali na dno budoucí štoly (33-39 m) až po dvou letech těžké práce. Stavbu zpomalily také finanční problémy. Dvorní koncipista Isaac Phendler byl pověřen zhotovením plánu stavby, pro kontrolu postupu prací. Průměrný měsíční postup byl 8,3 m. V úsecích s výskytem tvrdé horniny se použila technika sázení ohněm. Rozměry štoly byly 3,5 x 2,2 m. Ze dna každé šachty havíři razili na obě strany proti sobě. V roce 1593 byla stavba dokončena, trvala tedy 10 let.

- Plán Isaaca Phendlera

Tento plán byl zhotoven velice pečlivě začátkem roku 1593 a to 10 let po začátku ražby (Obrázek 33). Je ilustrován barevně na pergamenovém svitku dlouhém 242 cm a širokém 20 cm. Štolu na něm můžeme vidět v celé své délce, a to v měřítku s rozměry a vzdálenostmi. Dokonce i s peněžním rozpočtem, a to v pravém horním rohu. Časový plán je zde zaznamenán na roky, dny i hodiny. Svislé šachty jsou kryty dřevěnými přístřešky, pod nimi jsou nakresleny rumpály pro dopravu rubaniny na povrch. Všechny popisky jsou psány ve španělštině, jazyk císaři nejbližší. Nyní plánek vlastní Národní technické muzeum v Praze.



Obrázek 33: Plán Isaaca Phendlera
(<https://stavbaweb.dumabyt.cz/rudolfova-stola-9729/clanek.html>)

- Technické parametry šachty

Délka 1 098 m

Převýšení na celé délce je 1,20 m

Výška 2-4 m

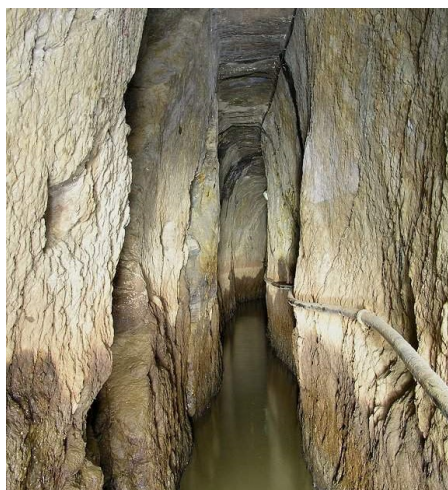
Šířka 0,9-1,5 m

Štola má vejčitý tvar, dno je pokryto keramickými žlabovkami (Obrázek 34). Ukončena zděnými portály, ozdobenými korunkou a letopočtem 1593 a iniciálou R (Obrázek 35). Šachta je zhruba 45 m pod dnešní zástavbou Letné. Její trasa začíná v domku na vltavském nábřeží dále na nábřeží Edvarda Beneše mezi Čechovým a Štefanovým mostem, pod Letenskými sady a ulicí Nad štolou, dále pod Letenským náměstím. Čechovou ulicí a horní částí Královské obory až k domu poblíž Šlechtovy restaurace. Měla mít pět větracích a zároveň razících šachet. Nakonec se zhotovily pouze čtyři šachty, jelikož třetí šachta byla při

výstavbě zrušena a zasypána, kvůli průsaku podzemních vod. Šachty štolu odvětrávají dodnes.

- **Zajímavosti**

Stavba se musí pravidelně jednou za rok čistit. Jelikož kleslo dno Vltavy, ve štolě se usazuje více nánosů v podobě jílu a bahna. Na mnoha místech štolý bývá až půlmetrová vrstva nánosů, který vltavské vody nestíhají odplavit. I v moderních dobách se museli stavitelé potýkat s touto památkou. Při stavbě Letenského tunelu na počátku 50. let 20. století. Jeho vozovka totiž míjí strop štolý o pouhých 2,8 m. Letenský tunel má délku 423 m a překonává převýšení 33 m. [10]



Obrázek 34: Pohled do štolý
(https://blovi.rajce.idnes.cz/Rudolfova_stola_v_Praze/)



Obrázek 35: Portál štolý
http://agartha.cz/html/pruzkumy/praha/rudolf_stola/index.php

4.3. Tunel Malpas

Tunel Malpas je součástí plavebního kanálu Canal du Midi ve Francii. Kanál byl vybudován, aby propojil Středozemní moře a Atlantický oceán. Stavba tunelu byla zahájena roku 1665 a dokončena roku 1681. Jelikož byl tunel malý a temný, lodě na druhý konec tunelu nemohli táhnout koně. U vchodu do tunelu stáli muži, kteří lodě tahali ručně a koně musely po vedlejší cestě. Výstavbou tohoto tunelu začala éra klasických tunelů.

Tunel je dlouhý 157 m, široký 6,7 až 8,2 m a vysoký 8,2 m.

Budování tunelu v písčitém tufu signalizuje, že stavba byla velmi náchylná k sesuvům. Chodníky na bocích tunelu byly zhotoveny na tahání lodí přes tunel. Následně byl chodník na pravé straně zrušen, aby mohly proplout širší lodě. Zdá se, že Malpas byl první tunel vyhotovený trhačími pracemi. Ovšem otvory na střelný prach se vyvrtávaly ručně. Dnes je tunel turistickou atrakcí. (Obrázek 36), (Obrázek 37), [13], [30]



Obrázek 36: Tunel Malpas 1886
(<http://www.plan-canal-du-midi.com/wp-content/uploads/2015/03/201503101423-full.jpg>)



Obrázek 37: Tunel Malpas dnes
(<https://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-s/10/3e/a6/a3/tunnel-de-malpas.jpg>)

4.4. Dědičná štola císaře Josefa II.

Štola se nachází v obci Trhové Dušníky (Obrázek 38). Je odvodňovací štolou rudného dolu. Bez jakýchkoliv plánů byla zahájena ražba v roce 1789. U jejího zrodu stál horník Ignác Anton Putz. Ražba byla ukončena roku 1859. Hlavní štola mezi Bohutínem a Trhovými Dušnými měří 14 854 m, bez odboček. Celková délka štoly s odbočkami, které spojovaly štolu s doly činí 21 906 m. Účelem bylo odvádět samospádem vodu ze všech dolů březohorského a bohutínského revíru. Vodu neodváděla jen z jam Hurka, Kozicín a Lill. Ražba byla prováděna z několika míst současně a přes náročnost tohoto díla a komplikovanost měřících prací, je vybudována velmi přesně.

Štola má oválný průřez se silně protaženou svislou osou. Šířka štoly je 1,1 - 1,5m. Výška je od 2,6 do 3,8m. Plocha průřezu štoly se pohybuje od 3 m² do 5 m².

Dědičná štola dodnes slouží svému účelu. Do seznamu chráněných památek se dostala roku 1958. [14], [15]



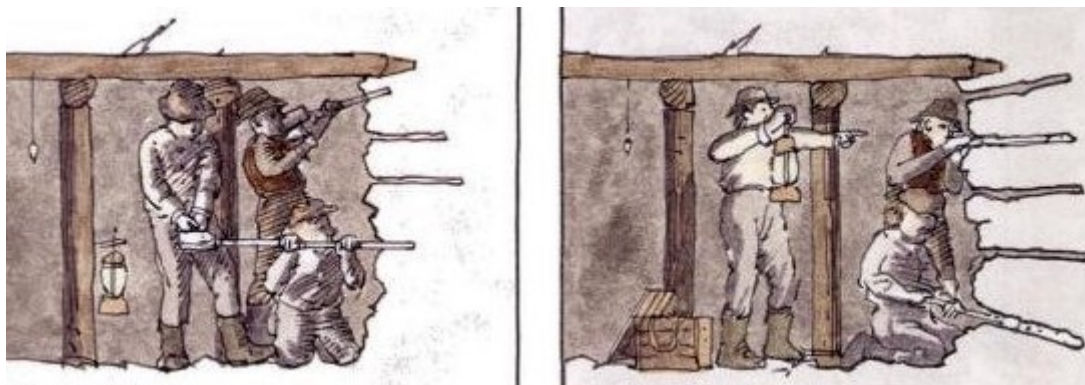
Obrázek 38: Pohled do štoly
(http://blovi.rajce.idnes.cz/dedicna_stola_Trhove_Dusniky/)

4.5. Tunel Hoosac

Tento železniční dvojkolejný tunel prochází téměř 5 km pohořím Hoosac v západním Massachusetts (USA). Vychází z měst North Adams na jeho západní straně, Massachusetts na východní straně.

Na východní straně horu tvoří silná křemenná břidlice. Hřeben hory přechází v měkčí a snadněji se rozpadající slídovou břidlici a rulu, po větší část jsou vrstvy této horniny orientovány spíše vertikálně k poloze tunelu.

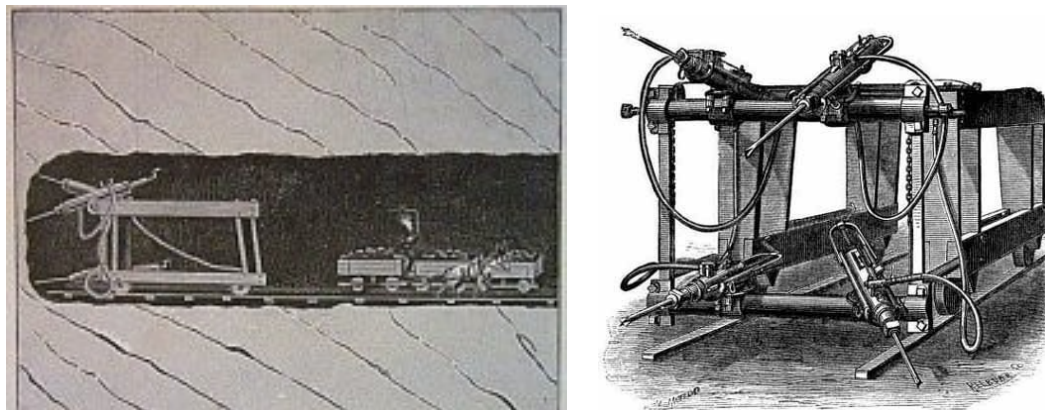
S prací se začalo roku 1851 na severní straně v městě Adams. Na východní straně práce začaly během léta roku 1852, nasazen byl nechvalně známý Wilsonův patent (Wilson Stone-Cutting Machine). Myšlenka spočívala v tom, že stroj měl vyřezat drážku po obvodu tunelu a jádro mělo být následně odstraněno pomocí trhacích prací (černý prach). Po zhruba 13,7 m se stroj zasekl a po několik let zůstal na místě, tato díra byla posléze využita jako kovářská dílna. Nový východní portál byl vybudován na pravé straně od prvního neúspěšného pokusu. Inženýři navrhli použití hvězdicových vrtáků, které byly poháněny ručně. První tým vyvrtal asi 0,6 m a druhý tým díry následně nabil černým prachem, dále následovala detonace (Obrázek 39).



Obrázek 39: Proces vrtání a nabíjení černého prachu
(<http://www.hoosactunnel.net/bore.php>)

V roce 1856 byly práce na zimu zastaveny. Na západním konci začal mít tunel potíže s rozpadající se klenbou (prosakující voda), tento problém byl následně vyřešen a 2 308 m bylo vyzděno šesti až osmi vrstvami cihel, které byly uloženy po obvodu tunelu do prstence. Také byla vybudována centrální šachta, která pomáhala tunel odvodnit, dále pak byly vybudovány další 4 odvodňovací šachty na západní straně tunelu.

V roce 1863 stavbu tunelu převzal stát. Vrtání dále probíhalo pomocí stlačeného vzduchu a se silnější trhavinou. Vrtačky (Burleigh Drill) byly namontovány na pohyblivých vozících a připojeny gumovými hadicemi ke kompresoru (Obrázek 40). Na povrchu bylo vybudováno 6 kamenných věží, které měly sloužit pro vyrovnávání tunelu.



Obrázek 40: Vrtačka (Burleigh Drill) použita při stavbě
(<http://www.hoosactunnel.net/bore.php>)

V roce 1867 začaly na stavbě tunelu experimenty s nitroglycerinem iniciovaným statickými elektrickými detonátory. S objevem těchto nových technologií činilo z tunelu první rozsáhlou stavbu za použití nitroglycerinu a rozbušek.

Tunelem dne 9. února 1875 projel první vlak, avšak státem byl oficiálně otevřen až 1. července 1876. Šířka tunelu je 7,3 m a výška 6,1 m. Tunel je dlouhý 7,4 km a je v současnosti železniční tratí Springfield Terminal Guilford. Jednalo se o nejdelší tunel Severní Ameriky až do roku 1916 a je stále aktivní. (Obrázek 41) [28], [29], [30]



Obrázek 41: Tato fotografie ukazuje vodní věž pro parní vlaky, stejně jako nepovedený slepý portál po levé straně od tunelu. Tato pohlednice je pravděpodobně z let 1910.
(<http://www.hoosactunnel.net/east.php>)

4.6. Tunel Mount Cenis (Fréjus)

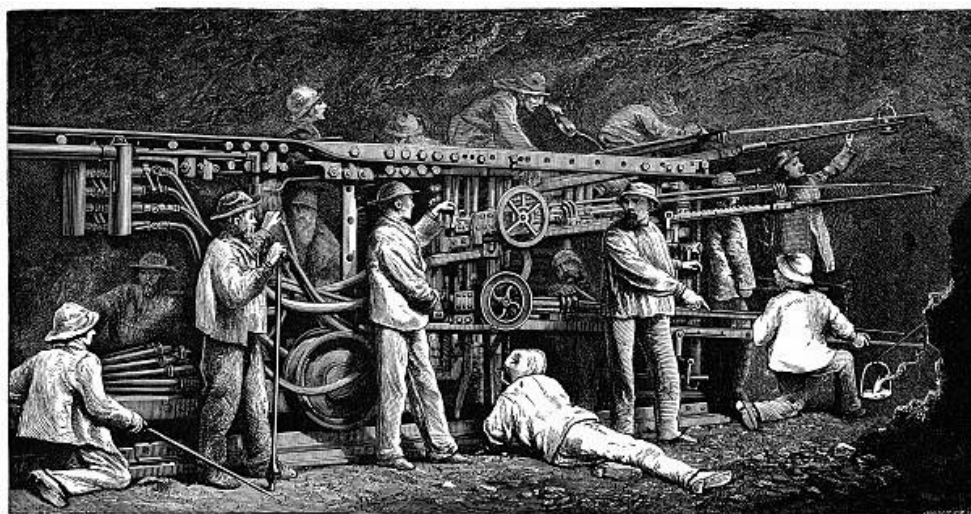
Tunel Fréjus je jedním z nejstarších skalních tunelů v Alpách. Stavbu tunelu vedl Germain Sommeiller. Stavba tohoto železničního tunelu vedoucího skrz Alpy byla zahájena roku 1854. Průzkum zahájen v roce 1858, posléze přípravné práce (kanály, zkoušky kompresorů). V roce 1861 a 1862 byly zahájeny vrtací práce na obou portálech.

Tunel probíhá pohořím Mount Cenis a spojuje města Bardonecchii (Itálie) a Modane (Francie). Stavba protíná geologické vrstvy v pravém úhlu, ale od severu a jihu v úhlu šikmém. Pokud jde o geologickou formu původu, tak v podloží najdeme křemen, pískovec, břidlici, vápenec.

Tunel byl vyhotoven trhacími pracemi pomocí vrtaček Sommeiller. Při jednom razícím cyklu se vrtalo 80 děr, 3 z nich ve středu s průměrem větším než 3 cm (pro snadnější výlom)(Obrázek 42). Po nabití všech vrtů mimo třech větších ve středu a kaloty, začala detonace. Nejprve byla odstřelena skupina 1, pak 2 a následně 3. Skupina 4 se nabila a odpálila až po odklizu rubaniny. Dále byl výlom zajištěn belgickou metodou.

Větrání tunelu bylo zajištěno potrubím se stlačeným vzduchem, ze dvou kompresorů pohaněných vodním kolem na italské konci. Tunel byl opatřen olejovými lampami a dále popisky se vzdáleností od portálu.

Průměrná nadmořská výška tunelu je 1 123 m.n.m. Celková délka je 13,44 km. Tunel je ve spodní části téměř 11,5 m široký a 10 m vysoký. Tunel byl dokončen 17. září roku 1876. [28], [29], [30]



Obrázek 42: Sommeiller, vrtačka na stlačený vzduch používaná v železničních tunelech Mont Cenis (<https://www.gettyimages.com/detail/news-photo/germain-sommeillers-compressed-air-rock-drill-used-in-the-news-photo/629562123>)

4.7. Gotthardský železniční tunel

Tunel se nachází ve Švýcarsku a vede Gotthardským masivem. Byl budován v letech 1871-1882 švýcarským inženýrem Louišem Favre. Byl prvním tunelem Gotthardského masivu. Na stavbě se potýkali s technickými i ekonomickými problémy, jelikož neměli dost financí. Mimo to v tunelu bylo nad 30 stupňů a špatně fungující ventilace. Dělníci pracovali ve ztížených pracovních podmínkách. Během stavby zemřelo asi 200 dělníků. Příčiny byly průvaly vody, nečekané výbuchy dynamitu nebo nehody při stavbě. Stavba trvala přes 9 let a tunel byl uveden do provozu v 1.1.1882. (Obrázek 43)

Trasa železničního tunelu vede z Göschenen (severní portál) do Airolo (jižní portál) a je dvoukolejný. Výsledky většinou ukazovaly, že většina masivu je kombinací granitové ruly, slídy a hornblendové břidlice. Sklony jednotlivých geologických vrstev byly vůči linii tunelu 45-80°.

Tunel byl vyhotoven trhacími pracemi. Každý vyvrtaný otvor byl nabit dynamitem a připraven k detonaci pojistkou Bickford (střelný prach obalený impregnovanou jutou). Pojistky nebyly stejně dlouhé, jako první byl odpálen střed čelby, pak horní a naposledy spodní řada náloží. Rubanina byla odtěžena ve vozících a dále byl výrub zajištěn belgickým výztužným systémem. Rychlost ražby byla 3-5 m za den. Muselo být překonáváno značné množství vody, někdy až 320 litrů za sekundu. Větrání bylo dosaženo pomocí turbín, poháněnými vzduchovými kompresory, které byly napájeny vodou. Se zvýšením mechanického vrtání, se zvýšil i počet kompresorů.

Celková délka tunelu je 15 km. Nejvyšší bod tunelu je 3 786 m.n.m. Ve své době byl tunel nejdelším tunelem na světě. Pokořil jej až v roce 1906 tunel Simplon. Tunel snížil náklady na přepravu lidí a zboží. Dokončením Gotthardského bázového tunelu v roce 2017, je budoucnost tohoto tunelu nejistá. [1], [28], [29], [30]



Obrázek 43: Stavba Gotthardského tunelu, Göschenen 1881

(<http://www.katovna-odry.cz/obyvatele/vzpomnka-na-ing-eduarda-gerlicha-profesora-vcarsk-federln-polytechnick-vysok-koly1-v-curychu-v-letech-1882-1903/>)

4.8. Chicago lake tunnel

Jelikož prosperující a vzrůstající město Chicago nemělo dostatek neznečištěné pitné vody, muselo přikročit k řešení problému. V roce 1860 byl vyhotoven plán pro tunel, který měl přivést městu pitnou a čistou vodu z jezera Michigen. Tunel musel být vyhotoven pod dnem jezera tak daleko, aby nasával neznečištěnou vodu z místa dostatečně vzdáleného od břehu. Tento tunel (akvadukt) navrhl v roce 1863 inženýr Ellis S. Chesbrough.

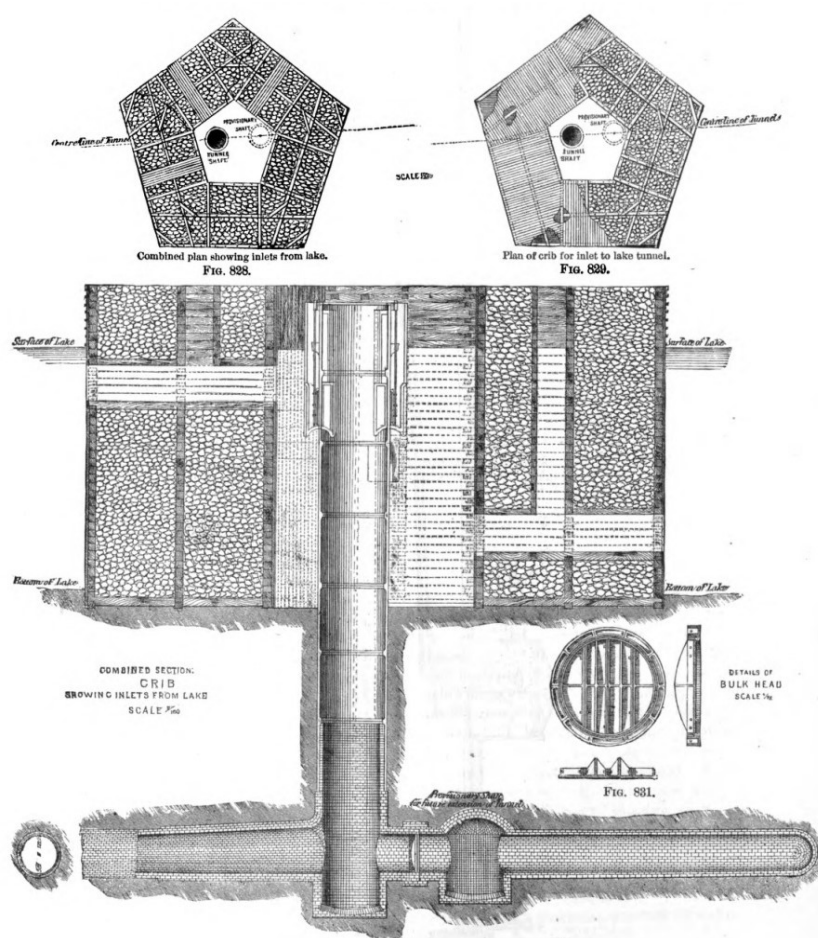
Práce na tunelu byla zahájena 17. března 1864 budováním šachty na břehu jezera. K hloubení byly objednány litinové skruže vysoké 3,4 m, průměru 2,74 m a tloušťce stěny 2,5 cm. Skruže spojeny šrouby byly dohromady tři, přičemž první byla opatřena ostrím, pro lepší prorážení zeminy. Hloubilo se přes různé stupně tuhosti jílu. Od měkkého až po nejtuzší u dna šachty. Následně vyzděná šachta měla 2,44 m v průměru a u její paty byla zhotovena jímka na vodu hluboká 1,83 m, která musela být vyprazdňována dvakrát denně. Tunelovací práce byly zahájeny 26. května 1864. Vstup do tunelu měl v průměru 1,83 m a zužoval se na 1,52 m. Ražba tunelu probíhala v jílu, ve které se občas vyskytovaly písčité kapsy. Když se nějaká z kapes v klenbě vysypala, musela se následně zaplnit zdivem a pokračovalo se dále. Jediný problém, který se vyskytl, byl hořlavý plyn. Ale dělníci se naučili velice brzo detekovat pukliny s tímto plynem a v okamžiku nálezu je zakrýt.

Hvězdicovitá jímací věž (Obrázek 44), byla zhotovena na břehu jezera a dopravena na místo určení pomocí parních remorkérů. Do své vertikální polohy na dno jezera, byla usazena vsypáním kamení do dřevěných dutých stěn věže. Výkopové práce v šachtě probíhaly stejně jako u šachty na břehu jezera (Obrázek 45). Do šachty bylo po odčerpání vody postupně spuštěno 7 sekcí litinových skruží o délce 7,43 m. Vrchní sekce byly opatřeny otvory pro čerpání vody z jezera. Po dosažení hloubky tunelu, pokračovaly výkopové práce horizontálně, aby mohlo být zajištěno navázání na již rozestavěný tunel z břehu jezera. Dále byla věž pro ochranu lodí osazena majákem a mlžným zvonkem, který zvonil každou minutu v době špatné viditelnosti.

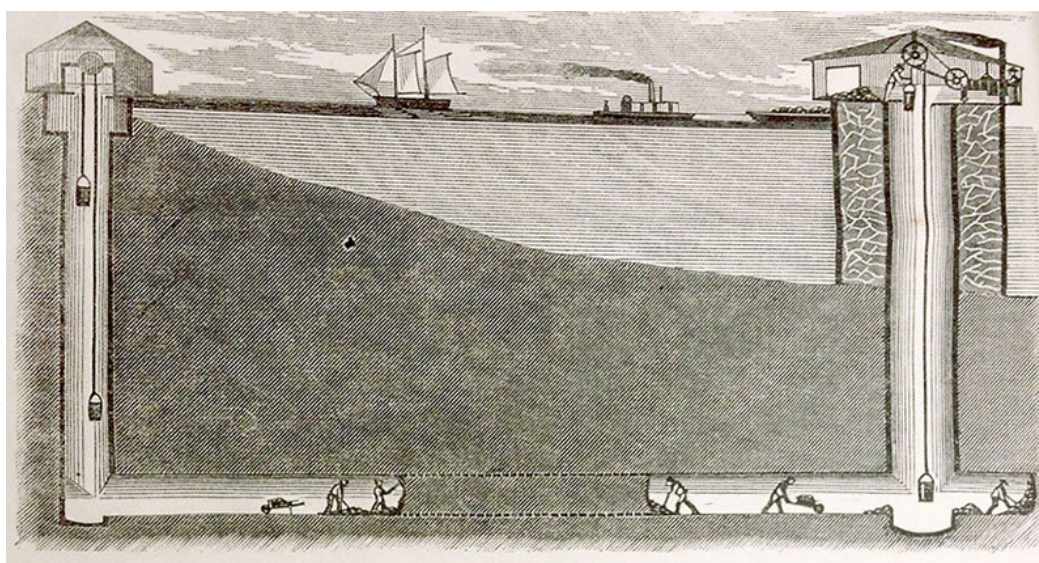
Větrání tunelu bylo zajištěno cínovými trubkami, kterými byl znečištěný vzduch pomocí ventilátoru vysát ven a čerstvý vzduch vháněn hlavním otvorem.

Tunel byl dokončen 30. listopadu 1866 a první vpuštění vody bylo 8. března 1867. Však s napouštěním tunelu se postupovalo opatrně, aby nedošlo k příliš velkému tlaku vody

na zdivo tunelu. Následně byl tunel vypuštěn a zkontrolován (Nevykazoval žádný problém). Po prohlídce byl tunel opět napuštěn a dne 24. března 1867 zprovozněn. [25], [26], [28], [29]



Obrázek 44: Půdorys a řez jímací věží a části tunelu pod ní
(<https://babel.hathitrust.org/cgi/imagerv/image?id=mdp.39015086601559;seq=837;width=1020>)



Obrázek 45: lustrace z knihy *The Great Chicago Lake Tunnel* , publikované v roce 1867
(<http://shifting-grounds.net/pre-history/tunnel-main.html>)

5. Závěr

Cílem mé práce bylo popsat účel historických podzemních staveb, které byly budovány. Také důvod proč je lidé budovali a jak pro ně byla důležitá. Důkazem jsou akvadukty nebo kanalizace, bez kterých by velká města nemohla existovat, jelikož pitná voda byla velice důležitá.

Popsala jsem ražbu těchto staveb za použití historických technologií a nástrojů. Ovšem principy a zásady tehdejších realizačních prostředků ražby a vyztužování podzemních děl včetně metod jejich výstavby jsou obsaženy v soudobých technologiích a metodách, které je zdokonalily, zefektivnily a učinily bezpečnějšími.

Cílem mé práce bylo také ukázat, že lidé budovali podzemní díla již před tisíci lety. Nebylo to pro ně snadné s jejich primitivními nástroji, ale dokázali vybudovat úchvatná a technicky dokonalá díla. Důkazem jsou stavby uvedené ve čtvrté kapitole, které slouží stále svým účelům nebo jako chráněné památky a turistické atrakce. Doufám, že má práce přiblíží lidem (třeba i neznalých v tomto oboru) poučnou a krásnou historii podzemního stavitelství.

6. Seznamy

6.1. Seznam obrázků

Obrázek 1: Malby v jeskyni Lascaux (http://www.sacred-sites.org/threatened-sacred-sites/lascaux-cave/).....	2
Obrázek 2: Řez chrámem Abu Simbel (http://etc.usf.edu/clipart/59100/59162/59162abusimbelcs.htm).....	3
Obrázek 3: Stavby na Lýkijském pobřeží (https://rainbowtours.cz/uploads/image/image/125512/hotel_804_66358_65071_1920x730.jpg).....	4
Obrázek 5: Kalixtovy katakomby (http://www.nepomucenum.it/2017/11/navsteva-katakomb.html)	5
Obrázek 4: nekropole Pantalica (https://www.thethinkingtraveller.com/thinksicily/guide-to-sicily/archaeological-sites-in-sicily/the-necropolis-of-pantalica.aspx).....	5
Obrázek 6: komplex Longyou v Číně	6
Obrázek 7: Bhaja cave (půdorys a řez) (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/aa/Bhaja_caves_plan.jpg).....	7
Obrázek 8: Kappadokie (http://turecko.webz.cz/Fotky/8-28-Zelve.JPG).....	8
Obrázek 9: Město Petra (http://www.sokujiciplaneta.cz/files/images/Ur_n_Tomb_Petra_01.jpg).....	8
Obrázek 10: Příčné řezy starověkých štol a) vodovodní štola v Aténách, b) štola na odvodnění Fucinského jezera 1 – kamenné zdivo (http://docplayer.cz/1724870-Podzemni-stavitelstvi.html).....	10
Obrázek 11: Cloaca Maxima – půdorys vedení kanalizace městem a řez štolou (http://khs11cityofrome.weebly.com/cloaca-maxima.html)	11
Obrázek 12: Bazilika cisterna (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/20/Cisterna_Basilica_Junto_a_Santa_Sofia_Estambul.JPG).....	12
Obrázek 13: Riqueval tunel (https://binnenvaartinbeeld.com/GB/canal_de_saint_quentin/tunnel_riqueval).....	13
Obrázek 14: Tunel Sigmundstón (současnost) (http://www.staedte-fotos.de/bild/oesterreich~salzburg~salzburg/33776/salzburg---sigmundstoe-frueher-neutor-durchfahrt.html).....	14
Obrázek 15: Výkop tunelu Rotherhithe, asi kolem roku 1840 (https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/Thames_tunnel1840.jpg)	14
Obrázek 16: Jižní portál tunelu Kilsby s budovou P & W, která byla postavena vlevo. (http://www.warwickshirerailways.com/lms/lnwrkt3564.htm)	15
Obrázek 17. Větrací šachta tunelu Kilsby (<a)<="" a="" href="https://www.google.cz/search?q=Tunel+Kilsby&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKewjPwpy6nM_eAhUEuRoKHYqyDmYQ_AUIDygC&biw=1536&bih=723#imgsrc=cbFPGplbHBq66M:">	15

Obrázek 18: Třebovický tunel v roce 1845 (https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99ebovick%C3%BD_tunel#/media/File:Tunnel_bei_Triebitz_1845.jpg).....	16
Obrázek 19: Fotografie Henryho Flathera, ukazuje výstavbu železničních tratí Metropolitan District Railway, která se uskutečnila mezi lety 1866 a 1870 a která zahrnovala i zničení domů (https://www.dailymail.co.uk/news/article-2259177/London-Underground-Amazing-images-houses-demolished-Tube-1863.html).....	17
Obrázek 20: Historické geodetické nástroje (http://www.romanaqueducts.info/technicalintro/surveyingtools.htm).....	21
Obrázek 21: Mlátek s želižky – historické nálezy (https://vmfoto.nolimit.cz/rubriky/galerie/hornicke-artefakty/unnamed-3).....	22
Obrázek 22: Technika sázení ohně (http://www.stolajohannes.cz/cs/stola/zpusob-dobyvani.html)	22
Obrázek 23: Brunelův razicí štít (http://www.ajhw.co.uk/books/book449/book449.html#Page_221)	24
Obrázek 24: TBM od C. Wilsona (http://wiley-vch.e-bookshelf.de/mobile/products/reading-epub/product-id/602705/title/hardrock+tunnel+boring+machines.html).....	25
Obrázek 25: Ferroux Boring Machine (https://www.oldbookillustrations.com/illustrations/ferroux-boring-machine/).....	25
Obrázek 26: Belgická soustava (předloha: http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/2018/YPZU/Prednaska%20A%20Tunelovac%C3%AD%20metody%20Uvod.pdf)	26
Obrázek 27: Anglická soustava (předloha: http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/2018/YPZU/Prednaska%20A%20Tunelovac%C3%AD%20metody%20Uvod.pdf)	27
Obrázek 28: Německá soustava (předloha: http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/2018/YPZU/Prednaska%20A%20Tunelovac%C3%AD%20metody%20Uvod.pdf)	27
Obrázek 29: Rakouská soustava (předloha: http://people.fsv.cvut.cz/~Pruskjan/2018/YPZU/Prednaska%20A%20Tunelovac%C3%AD%20metody%20Uvod.pdf)	28
Obrázek č.30: Řez a půdorys trasy viaduktu (http://ws.iwaponline.com/content/ppiwawstws/16/5/1159/F4.large.jpg)	31
Obrázek č.31: Půdorys trasy viaduktu s vyznačenými trasami (http://www.samostour.dk/index.php/places-a-tours/special-reports/eupalinos-tunnel).....	31
Obrázek 32: Pohled do tunelu Eupalinos (https://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel_of_Eupalinos)	32
Obrázek 33: Plán Isaaca Phendlera (https://stavbaweb.dumabyt.cz/rudolfova-stola-9729/clanek.html).....	34
Obrázek 34: Pohled do štoly (https://blovi.rajce.idnes.cz/Rudolfova_stola_v_Praze/)	35
Obrázek 35: Portál štoly http://agartha.cz/html/pruzkumy/praha/rudolf_stola/index.php	35
Obrázek 36: Tunel Malpas 1886 (http://www.plan-canal-du-midi.com/wp-content/uploads/2015/03/201503101423-full.jpg).....	36

Obrázek 37: Tunel Malpas dnes (https://media-cdn.tripadvisor.com/media/photo-s/10/3e/a6/a3/tunnel-de-malpas.jpg)	36
Obrázek 38: Pohled do štoly (http://blovi.rajce.idnes.cz/dedicna_stola_Trhove_Dusniky/)..	37
Obrázek 39: Proces vrtání a nabíjení černého prachu (http://www.hoosactunnel.net/bore.php)	38
Obrázek 40: Vrtačka (Burleigh Drill) použita při stavbě (http://www.hoosactunnel.net/bore.php)	39
Obrázek 41: Tato fotografie ukazuje vodní věž pro parní vlaky, stejně jako nepovedený slepý portál po levé straně od tunelu. Tato pohlednice je pravděpodobně z let 1910. (http://www.hoosactunnel.net/east.php)	39
Obrázek 42: Sommeiller, vrtačka na stlačený vzduch používaná v železničních tunelech Mont Cenis (https://www.gettyimages.com/detail/news-photo/germain-sommeillers-compressed-air-rock-drill-used-in-the-news-photo/629562123)	40
Obrázek 43: Stavba Gotthardského tunelu, Göschenen 1881 (http://www.katovna-odry.cz/obyvatele/vzpomnka-na-ing-eduarda-gerlicha-profesora-vcarsk-federln-polytechnick-vysok-koly1-v-curychu-v-letech-1882-1903/)	41
Obrázek 44: Půdorys a řez jímací věží a části tunelu pod ní (https://babel.hathitrust.org/cgi/imsrv/image?id=mdp.39015086601559;seq=837;width=1020)	43
Obrázek 45: lustrace z knihy The Great Chicago Lake Tunnel , publikované v roce 1867 (http://shifting-grounds.net/pre-history/tunnel-main.html)	43

6.2. Seznam použité literatury

• Časopis

- [1] HORÁK, CSC., doc. Ing. VLADISLAV a Ing. RICHARD SVOBODA, PH.D. Z historie podzemních staveb. Tunel [online]. 2014, 23(4), str. 87-88 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2014/4/tunel_4_14-15.pdf
- [2] HANZL, CSC., DOC. ING. VLASTIMIL a DOC. ING. VLADISLAV HORÁK, CSC. EUPALINŮV TUNEL/ŠTOLA NA OSTROVĚ SAMOS. Tunel [online]. 2012, 21(3), str. 38-45 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2012/3/tunel_3_12-9.pdf
- [3] KLEPSATEL, PHD., prof. Ing. FRANTIŠEK a ING. JANA CHABROŇOVÁ, PHD. VÝSTAVBA TUNELOV NA SLOVENSKU KLASICKÝMI METÓDAMI. Tunel [online]. 2015, 24(3), str. 48-60 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: https://www.ita-aites.cz/files/tunel/2015/150902_tunel.pdf

• URL

- [4] Nejen HORNICTVÍ.info [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://podzemi.solvayovylomy.cz/>
- [5] ŠTOLA JOHANNES [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://www.stolajohannes.cz/cs/stola>

- [6] *Uplistsikhe* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://gruzie.net/uplistsikhe/>
- [7] CÍLKA, V. a J. HARVANA. *Podzemní lomy* [online]. 2000 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/porady/1031888653-podzemni-cechy/201324249240006-podzemni-lomy/>
- [8] *SKALNÍ MĚSTO PETRA – JORDÁNSKO* [online]. 2017 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://e-aktuality.cz/skalni-mesto-petra-jordansko/>
- [9] *CLOACA MAXIMA* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://khs11cityofrome.weebly.com/cloaca-maxima.html>
- [10] *Rudolfova štola* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://stavbaweb.dumabyt.cz/rudolfova-stola-9729/clanek.html>
- [11] HUGHES, Dan a Hansa KELLERA. *Tunel Eupalinos* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://homepages.cwi.nl/~aeb/math/samos/>
- [12] *Nástroje pro vyrovnávání* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: http://www.romanaqueducts.info/picturedictionary/pd_onderwerpen/tools.htm
- [13] *A LITTLE GLOSSARY ABOUT THE CANAL DU MIDI* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://en.tourismecanaldumidi.fr/Discover/Near-the-canal/History/A-little-glossary-about-the-canal-du-Midi>
- [14] *Rudný důl - dědičná štola císaře Josefa II.* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://www.pamatkovykatalog.cz/?element=14458237&sequence=3&mode=fulltext@ion%5B0%5D=St%C5%99edo%C4%8Desk%C3%BD+kraj&county%5B0%5D=P%C5%99%C3%ADbram&municipality%5B0%5D=Trhov%C3%A9+Du%C5%A1n%C3%ADky&order=relevance%3Adesc&action=element&presenter=ElementsResults>
- [15] *Dědičná štola - Příbramské dolování* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: https://www.geocaching.com/geocache/GC1P0CY_dedicna-stola-pribramske-dolovani?guid=6ae1c3b1-5c19-48ec-9c0d-ffa7042978fb
- [16] ŽÁKOVÁ, Lucie. *Tajné chodby pod Českou republikou* [online]. 2013 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://magazin.cz/cestovani/8897-tajne-chodby-pod-ceskou-republikou>
- [17] *Lýkijské pobřeží. Průvodce po Turecku* [online]. Turecko, 7. září 2013 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <https://www.turecko-web.cz/clanky/lykijske-pobrezi>
- [18] SCHUBERTOVÁ, Veronika. *Itálie, okolí Říma. Infoglobe* [online]. 23. března 2017 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <http://www.infoglobe.cz/cestovatelsky-pruvodce/italie-okoli-rima-navsteva-etruske-nekropole-banditaccia-u-cerveteri/>
- [19] *Záhadné jeskyně v čínské hoře Chua-san. Sueneé universe* [online]. 6. října 2016 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <https://www.suenee.cz/zahadne-jeskyne-v-cinske-hore-chua-san/>
- [20] *BHAJSKÉ JESKYNĚ. Wondermondo* [online]. 22. srpna 2010 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <https://www.wondermondo.com/bhaja-caves/>
- [21] TOPINKA, Ing. František. *Štoly nejstarší na světě. Casopis czech industry* [online]. [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <http://www.casopisczechindustry.cz/products/stoly-nejstarsi-na-svete/>

- [22] Bazilika Cisterna v Istanbulu. *Šokující planeta* [online]. 3. ledna 2018 [cit. 2018-11-25].
Dostupné z: <http://www.sokujiciplaneta.cz/cestovani/sub-bazilika-cisterna-v-istanbulu>
- [23] Surveying tools. *Roman Aqueducts* [online]. březen 2016 [cit. 2018-11-25].
Dostupné z: <http://www.romanaqueducts.info/technicalintro/surveyingtools.htm>
- [24] HORÁK, Vladislav. Podzemní stavby. *Mário Lenčeš* [online]. 2007 [cit. 2018-11-25].
Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BF06-Podzemni%20stavby/oporypodzemn%C3%AD1.pdf>
- [25] Four Mile Crib Lighthouse. *Lighthousefriends* [online]. 2018 [cit. 2018-11-25].
Dostupné z: <http://lighthousefriends.com/light.asp?ID=865>
- [26] Shifting Grounds. *Lighthousefriends* [online]. [cit. 2018-11-25].
Dostupné z: <http://shifting-grounds.net/pre-history/tunnel-main.html>

• Knihy

- [27] MAIDL, Bernhard., Gerhard. WEHRMEYER a Marcus. DERBORT. *Hardrock tunnel boring machines*. Berlin: Ernst, c2008. ISBN isbn978-3-433-01676-3
- [28] BOARDMAN, Fon Wyman. *Tunnels*. New York: H. Z. Walck, 1960
- [29] Drinker, Henry S. 1850-1937. *Tunelování, výbušné směsi a hlubinné vrtačky*. New York: J. Wiley, 1878
- [30] Sandström, Gösta E. *Tunely*. [1. vydání] New York: Holt, Rinehart a Winston, 1963

6.3. Seznam příloh

Tabulka 1: Shrnutí kapitoly č.2. (2. Účel podzemních staveb) do časové osy

Tabulka 2: Shrnutí kapitoly č.3. (3. Metody a nástroje výstavby) do časové osy